



Jari Laiho

SolidWorks ja Inventor – 3D-mallinnusohjelmien vertailu mekaniikkasuunnittelussa

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Konetekniikka

Insinöörityö

10.11.2022

Tiivistelmä

Tekijä:	Jari Laiho
Otsikko:	SolidWorks ja Inventor - 3D-mallinnusohjelmien vertailu mekaniikkasuunnittelussa
Sivumäärä:	55 sivua
Aika:	10.11.2022
Tutkinto:	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma:	Konetekniikka
Ammatillinen pääaine:	Koneensuunnittelu
Ohjaajat:	Lehtori Tero Karttiala

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli vertailla kahta 3D-mallinnusohjelmaa ja niiden ominaisuuksia mekaniikkasuunnittelijan näkökulmasta. Tarkoitus oli myös vertailla ohjelmien käytettävyyttä ja tutkia kuinka samankaltaisia ohjelmat ovat, ja että löytykö niistä merkittäviä eroja ominaisuuksien tai käytettävyyden osalta.

Työ koostuu teoriaosuudesta, jossa käsitellään 3D-mallinnuksen historiaa ja parametrisen mallinnuksen perusteita, sekä käytännön osuudesta, jossa käydään läpi ohjelmien toimintoja, ominaisuuksia ja mallinnusprosessia. Kappaleet mallinnettiin aluksi Solidworks-ohjelmalla ja niistä luotiin kokoonpano. Vertailu suoritettiin mallintamalla samat kappaleet Inventor-ohjelmalla. Käytännön osasta muodostui suunnitteluohjelmia vertaileva aineisto. Aineistoa voi käyttää ohjemateriaalina, kun suunnittelija pohtii omiin tarpeisiinsa sopivaa ohjelmistoa.

Vertailun pohjalta voidaan todeta, että vaikka ohjelmat poikkeavat toisistaan merkittävästikin, on toisen ohjelman tuntemuksesta hyötyä ohjelman opettelussa. Käytön opettelua ei tarvitse aloittaa alusta ja käyttöliittymä ohjaa käyttäjää riittävästi, jotta mallinnus on sujuvaa. Molemmat ohjelmat suoriutuivat yksinkertaisesta osien mallinnuksesta ja kokoonpanon luomisesta.

Johtopäätöksenä voi todeta, että valintaan näiden kahden ohjelman välillä vaikuttaa käyttäjän oma subjektiivinen kokemus ohjelmien sopivuudesta. Ohjelmien hankinta- ja ylläpitokustannukset voivat myös nousta suurempaan rooliin ohjelmaa valittaessa.

Avainsanat: 3D-suunnittelu, 3D-suunnitteluohjelmat, Solidworks, Inventor

Abstract

Author: Jari Laiho
Title: SolidWorks and Inventor - Comparison of 3D modelling software
Number of Pages: 55 pages
Date: 10 November 2022

Degree: Bachelor of Engineering
Degree Programme: Mechanical Engineering
Professional Major: Machine Design Engineering
Supervisors: Tero Karttiala, Senior Lecturer

The objective of the thesis was to compare two 3D modelling software and their properties from mechanical designer's perspective. The purpose was also to compare usability and study how similar software are and are there significant differences.

Work consists of theoretical and practical part. Theoretical part studies the history of 3D modelling and basics of parametric modelling. Practical part concerns functions, features and the modelling process. Modelling was first performed with Solidworks, and an assembly was created. For comparison, parts and assembly were then created with Inventor. Practical part became a material that compares these design software. This material can be used as guide, when a designer is considering the best software for their purposes.

Based on this comparison, it can be stated, that although software differs from each other significantly, knowing the other can be beneficial to learning the other. It is not necessary to begin learning from the very basics, and the software guides the user sufficiently. Both software managed modelling simple parts and creating assembly.

Conclusion is that selection between the two software is influenced by subjective experience of the user. Acquisition and maintenance cost can also play a bigger role in selecting software.

Keywords: 3D modelling, 3D design software, Solidworks, Inventor

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	3D-mallinnus mekaniikkasuunnittelussa	1
2.1	Parametrinen piirremallinnus	2
2.2	3D-mallinnuksen historia	3
3	Ohjelmien vertailu	4
3.1	Ohjelman hankinta	4
3.2	Ominaisuudet	5
3.2.1	Käyttöliittymä	6
3.2.2	Mallityypit	9
3.2.3	Sketsaus	11
3.2.4	Piirteet	17
3.2.5	Ohutlevymallinnus	19
3.2.6	Kokoonpanot	22
3.2.7	Ominaisuuksien vertailu	26
3.3	Mallinnettavat kappaleet	28
3.4	Mallinnuksen kulku SolidWorksilla	29
3.4.1	Mäntä	29
3.4.2	Kiertokanki	34
3.4.3	Männäntappi ja sokka	39
3.4.4	Kokoonpano	40
3.5	Mallinnuksen kulku Inventorilla	43
3.5.1	Mäntä	44
3.5.2	Kiertokanki	47
3.5.3	Männäntappi ja sokka	48
3.5.4	Kokoonpano	49
3.6	Yhteenveto mallinnusprosessista	52
4	Työn tulosten arviointi	53
5	Yhteenveto	55
	Lähteet	1

Lyhenteet ja sanasto

3D:	Three dimensional, kolmiulotteinen
CAD:	Computer-aided design, tietokoneavusteinen suunnittelu
Constraint	Geometrian rajoite Inventorissa
Extrude	Pursotustyökalu
Flush	Geometrinen rajoitetyyppi Inventorissa
Mate	Geometrien rajoitetyyppi Solidworksissa
Model	3D-malli
Offset	Geometrian monistustyökalu
Ribbon	Nauhavalikko Windows ohjelmissa
Sketch	Kaksi- tai kolmiulotteinen geometria 3D-mallinnuksessa
Sketsata	Piirtää kaksiulotteista geometriaa
Suppress	Osan tai kokoonpanon poistaminen käytöstä
Toolbar	Työkalupalkki

1 Johdanto

Opinnäytetyön tarkoituksena oli vertailla kahta eri mekaniikkasuunnitteluun tarkoitettua 3D-suunnitteluohjelmistoa ja niiden mekaniikkasuunnittelussa käytettyjä ominaisuuksia ja toimintoja. Mekaniikkasuunnitteluun tarkoitettuja 3D-mallinnusohjelmia löytyy markkinoilta kymmeniä. Vertailuun valitsin suunnitteluohjelmat SolidWorks ja Inventor. Ohjelmat valitsin omien kokemuksieni perusteella. SolidWorks sekä Inventor ovat tulleet tutuksi opintoihin liittyvillä opintojaksoilla, SolidWorks myös työelämässä. Tässä työssä pyritään selvittämään onko ohjelmien välillä eroja ja vaikuttaako poikkeavuudet mallinnusprosessiin.

Vertailu suoritettiin mallintamalla kummallakin ohjelmalla polttomoottorin mäntä, kiertokanki, männäntappi ja sokka ja muodostamalla niistä kokoonpano. Kappaleiden mallintamiseen käytetään erilaisia menetelmiä monipuolisesti. Tavoitteena oli saada mahdollisimman laaja käsitys eri työkaluista.

Tarkoituksena oli tutkia suunnitteluohjelmien käytettävyyttä ja mahdollisia poikkeavuuksia suunnitteluprosessin vaiheissa. Työssä selvitettiin myös piirteiden välisiä eroja ja kokoonpanojen muodostamiseen käytettyjen ehtojen toimivuutta eri tilanteissa, joista voi olla hyötyä ajankäytöllisesti. On myös tutkittu käyttöliittymiä ja niiden välisiä eroja.

Tässä työssä keskitytään pelkästään parametrisen 3D-mallinnukseen mekaniikkasuunnittelussa. Piirustuksia ei tässä työssä käsitelty.

2 3D-mallinnus mekaniikkasuunnittelussa

Tietokoneavusteista kolmiulotteista suunnittelua kutsutaan 3D-mallintamiseksi. Syntyneitä kolmiulotteista mallia käytetään tuotteen hahmottamisen apuna tai tuotteen valmistamisen ohjeena käytettävien piirustuksen luomiseen. Osien ja

kokoonpanojen mitat ovat täsmälleen kuten ne ovat todellisuudessaakin. Onnistuneessa suunnittelussa luotujen osien ja kokoonpanojen on sovittava toisiinsa. 3D-mallinnusohjelmat mahdollistavat osien fyysisten ominaisuuksien asettamisen, kokonaisuuksien muodostamisen (kokoonpanot), sekä niiden tarkastelun. (Tuhola & Viitanen 2008: 33.)

3D-mallinnus vähentää suunnittelun kustannuksia, koska fyysisiä koemalleja ei tarvitse tehdä, jolloin säästetään materiaali- ja valmistuskustannuksissa. Mallien muokkaaminen ja korjaaminen helpottuu verrattuna perinteiseen kaksiulotteiseen piirtämiseen. (Tuhola & Viitanen 2008: 17.)

2.1 Parametrinen piirremallinnus

Parametrinen piirremallinnusjärjestelmä on suunnittelujärjestelmä, jolla tuotetaan kolmiulotteisia tuotemalleja, joita voidaan hyödyntää kaksiulotteisia piirustuksia laajemmin, esimerkiksi kokoonpanovirheiden ja törmäystarkastelun osalta. Parametrisuudella tarkoitetaan sitä, että mallien mittoja pystytään muuttamaan suunnittelun eri vaiheissa. Mallinnus helpottuu siltäkin osin, että suunnittelun alkuvaiheessa ei ole tiedossa tarkkoja mittoja, jolloin ne voidaan jättää epämääräisiksi, kunnes ne tarkentuvat. Muutoksien tekeminen helpottuu parametrisuuden myötä. Mittoja muutettaessa geometria muuttuu kohteessa, sekä kokoonpanoissa että piirustuksissa. Parametrinen mallinnus mahdollistaa myös relaatioiden ja ehtojen asettamisen mittojen välille, kuten symmetria-, samankeskisyys- tai yhdensuuntaisuusehtoja. (Hietikko 2020: 16.)

Piirremallinnuksella tarkoitetaan sitä, että malli koostuu piirteistä. Peruspiirteen luonnin jälkeen tehdään uusia piirteitä, kunnes mallinnettu kappale vastaa haluttua. Piirteet näkyvät myös piirrepuussa, jolloin niiden muuttaminenkin on helppoa. (Hietikko 2020: 16.)

Parametrinen piirremallinnus on yleisin menetelmä kaikessa mekaniikkasuunnittelussa (yli 90 %), joka johtuu pääasiassa siitä, että nykyaikaisessa tuotesuunnittelussa muutoksien tekeminen on yleistä. (Hietikko 2020: 16.)

2.2 3D-mallinnuksen historia

Vielä 1970-luvulla mekaniikkasuunnittelu tapahtui käsin piirtämällä piirustuspöydällä. Alkeellisia tietokoneita oli käytetty suunnitteluun jo 1960-luvulla, mutta vasta 1980-luvulla siirryttiin tietokoneavusteiseen suunnitteluun tietokoneiden tultua yleisille markkinoille. Suunnittelu oli pikemminkin tietokoneavusteista piirtämistä, jolla matkittiin piirustuslaudan käyttöä. Piirtäminen tapahtui 2D-ympäristössä, eikä piirretyt projektiot olleet kytköksissä toisiinsa. Mahdolliset muutokset oli tehtävä osapiirustuksiin ja kaikkiin kokoonpanopiirustuksiin, jota muutokset koskivat. (Hietikko 2020: 10.)

Ensimmäinen aito 3D-suunnitteluohjelmisto CATIA, julkaistiin 1982, Dassault Systèmesin viiden vuoden kehitystyön tuloksena. Nimi on lyhennetty sanoista Computer-Aided Three-Dimensional Interactive Application, joka tarkoittaa tietokoneavusteista, kolmiulotteista, interaktiivista sovellusta. (Hietikko 2020: 11.)

Autodesk perustettiin 1982 ja se julkaisi ensimmäisen tuotteensa, AutoCAD:n samana vuonna. Vuoteen 1986 mennessä AutoCADista oli tullut laajimmin käytetty suunnitteluohjelmisto maailmanlaajuisesti. (Bethany 2017a.) Autodesk julkaisi Inventor-suunnitteluohjelman vuonna 1999.

Ensimmäisen kaupallisesti menestyneen parametrisen piirremallinnusohjelman julkaisi Parametric Technology Corporation vuonna 1988. Ohjelma tunnettiin alkuun nimellä Pro/ENGINEER, joka myöhemmin vaihtui nimeen Creo. Ohjelman keskeisiin ominaisuuksiin kuului luodun mallin luomiseen käytettyjen askeleiden tallentaminen. Tätä ominaisuutta kutsuttiin historiapuuksi. (Langnau 2019.)

Vuonna 1993, Jon Hirschtick perusti SolidWorks Corporationin ja palkkasi insinööriyöryhmän kehittämään helposti lähestyttävän 3D-mallinnusohjelmiston Windows-alustalle. Tähän aikaan kaikki suosituimmat suunnitteluohjelmistot toimivat Unix-ympäristössä. Solidworks julkaistiin vuonna 1995. Mallin visuaalinen esitys oli ennennäkemätöntä. Malli oli valaistu ja varjostettu, joka oli suuri harppaus aiempien ohjelmistojen näyttäessä ainoastaan kappaleen rautalankamallin. Osat, kokoonpanot ja piirustukset olivat käytettävissä heti alussa. Ehtoja

(Mate) ei voinut vielä käyttää, mutta osat voitiin asetella paikoilleen kokoonpanoissa. SolidWorks osoittautui niin vakuuttavaksi, että vuonna 1997 Dassault Systèmes, joka oli tunnettu CATIA-ohjelmistostaan, osti SolidWorks Corporationin 320 miljoonalla dollarilla. (Oanes 2021; Bethany 2017b.)

3 Ohjelmien vertailu

Tässä luvussa käsitellään vertailuun valittuja ohjelmia ja niiden ominaisuuksia. Tarkoituksena on muodostaa lukijalle käsitys valittujen ohjelmien käyttöliittymistä, mallityypeistä sekä mallinnustyökaluista. Lisäksi mallinnetaan osat ja muodostetaan niistä kokoonpano kummallakin ohjelmalla.

3.1 Ohjelman hankinta

Solidworks tarjoaa ohjelmastaan kolmea versiota, jotka poikkeavat toisistaan ominaisuuksiltaan.

- 1- Standard
- 2- Professional
- 3- Premium

Standard-versio on perusversio, josta löytyy osamallinnus, kokoonpano ja piirustustyökalut, sekä erikoistyökalut ohutlevy-, pinta-, muottimallinukseen.

Professional-versio sisältää Standard-version ominaisuuksien lisäksi ECAD/MCAD-yhteistyön, automatisoidun kustannuslaskennan, laajan komponentti- ja osakirjaston, sekä fotorealistisen renderöinnin.

Premium-versio sisältää Professional-version ominaisuuksien lisäksi työkalut rakenteiden lujuuslaskentaan, liikeanalyysiin, pinnan levitykseen, käänteiseen suunnitteluun, sekä johdotusten ja putkitusten reititykseen. (Solidworks-tuotteet 2022.)

Solidworks ei ilmoita lisenssien hintoja verkkosivuillaan, vaan hinta muodostuu yrityksen tai yksityishenkilön tarpeiden mukaan.

Solidworks Standard -omistuslisenssin hinta on noin 6000 €. Toinen vaihtoehto hankkia lisenssi on vuokralisenssi. Edullisimmillaan sen voi hankkia hintaan 285 € kuukaudessa. Tämän lisäksi voi hankkia ylläpitopaketin, joka sisältää kaikki päivitykset, sekä päivitykset uusimpaan versioon, jos sellainen on saatavilla. Ylläpitopaketin hintaa ei ilmoiteta. (Solidworks-tuotteet 2022.)

Inventor ilmoittaa ohjelmiston hinnat verkkosivuillaan. Autodesk ei tarjoa omistuslisenssiä, vaan tarjolla on kaksi eri vaihtoehtoa vuokrata lisenssi. Vaihtoehtona on kolme eri maksuväliä jatkuvalle lisenssin vuokraukselle, sekä satunnaiseen käyttöön erillinen Flex-vaihtoehto, jossa hankitaan pisteitä, joita voi käyttää tarpeen mukaan lisenssin käyttämiseksi. Autodesk Flex mahdollistaa useiden Autodesk-ohjelmien käytön. Eri ohjelmat kuluttavat eri määrän pisteitä päivässä. 100 pistettä maksaa 321 €. Inventor-ohjelma kuluttaa 8 pistettä päivässä, joten päivän hinnaksi muodostuu noin 26 €. (Inventor 2022.)

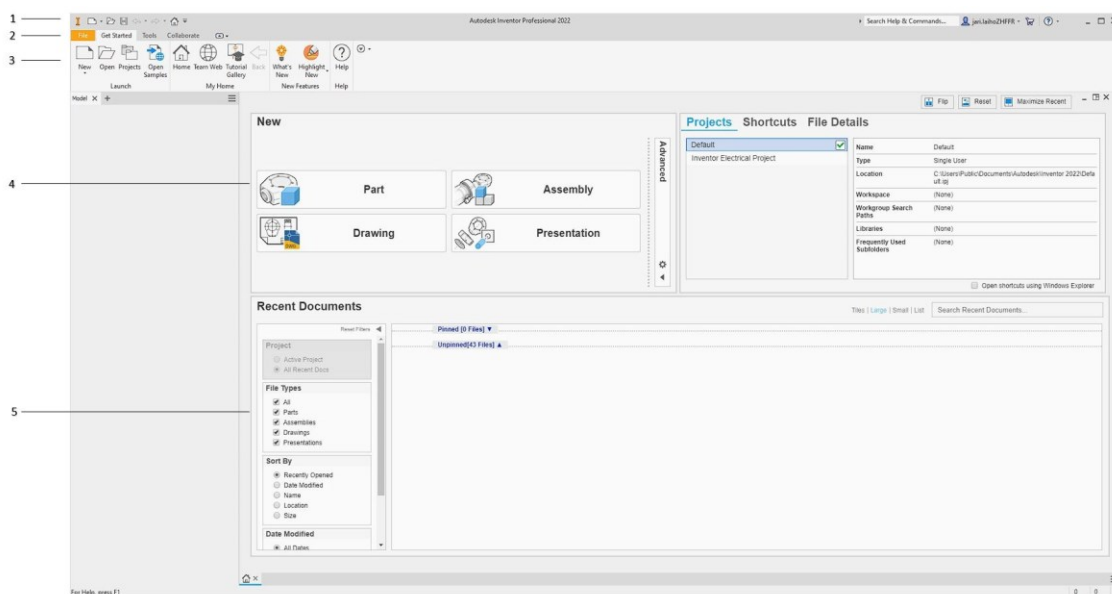
3 vuoden maksuvälillä olevan lisenssin laskutus on 8222 €. Vuoden välein maksettavan lisenssin hinta on 2886 €. Kuukausittain maksettavan lisenssin hinta on 363 €.

3.2 Ominaisuudet

Tässä luvussa käsitellään ohjelmien ominaisuuksia ja lopuksi tarkastellaan vertailun tuloksia.

3.2.1 Käyttöliittymä

Kummastakin ohjelmasta oli käytössä vuoden 2022 versio. Solidworksin ja Inventorin käyttöliittymät ovat hyvin samankaltaiset. Molemmat hyödyntävät Microsoftin Ribbon-käyttöliittymä (nauhavalikko), joka on tuttu Windows Office ohjelmista. Kuvassa 1. Inventorin selkeä avausnäky, jossa uuden dokumentin luominen, sekä viimeaikaiset dokumentit, jotka saa helposti avattua ilman niiden etsimistä valikoista.



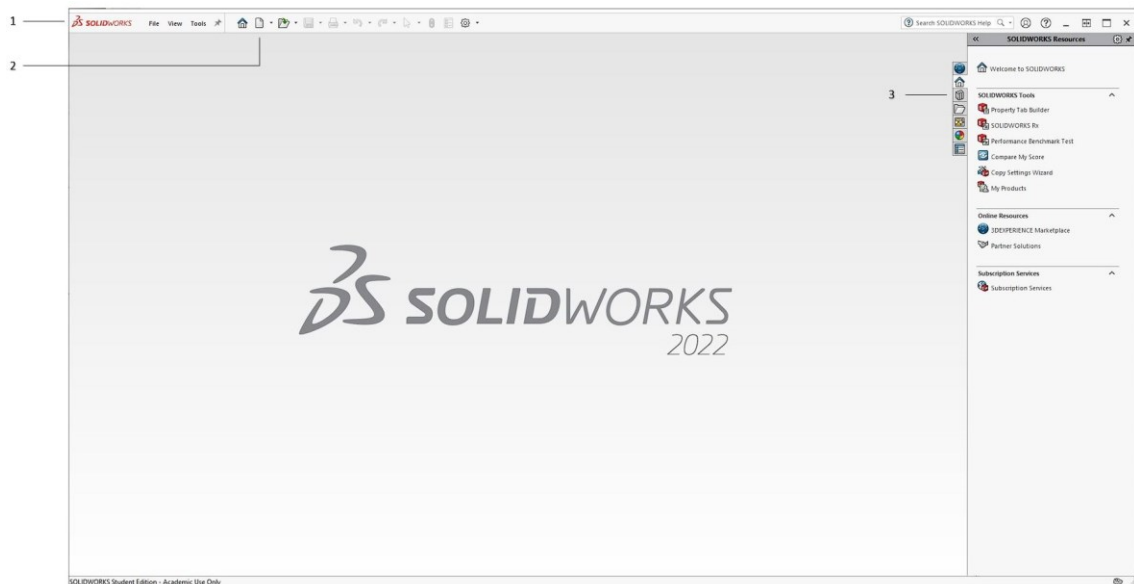
Kuva 1. Inventorin sovellusikkuna

Inventorin sovellusikkunan toiminnot:

- 1- Quick access toolbar. Työkalupalkki, joka sisältää avaa, uusi tiedosto, tallennus, undo- ja redopainikkeet
- 2- Pudotusvalikko asetuksille ja kolme ribbon-välilehteä toiminnoille ja työkaluille.
- 3- Ribbon, jossa painikkeet valitun välilehden mukaisesti.
- 4- Valinnat uuden dokumentin luomista varten
- 5- Viimeksi käytetyt tiedostot.

Solidworksin käyttöliittymä koostuu sovellusikkunasta ja grafiikkaikkunasta. Sovellusikkuna on aina näkyvässä ja grafiikkaikkuna aukeaa sovellusikkunan sisään. Muokattavat tiedostot aukeavat grafiikkaikkunoihin ja niitä voi olla auki useampia samaan aikaan. (Hietikko 2020: 19.)

Kuvassa 2 Solidworksin sovellusikkuna, joka on käytännössä tyhjä sivu, jossa keskellä ”DS Solidworks 2022” -teksti. File-valikon takaa löytyy New, Open, sekä Browse Recent Files -painikkeet. Solidworks muistaa Inventorin tapaan viimeksi käytetyt tiedostot. Lisäksi on mahdollista selata viimeksi käytettyjä kansioita. Tämä toiminto ei ole mahdollista Inventorissa.

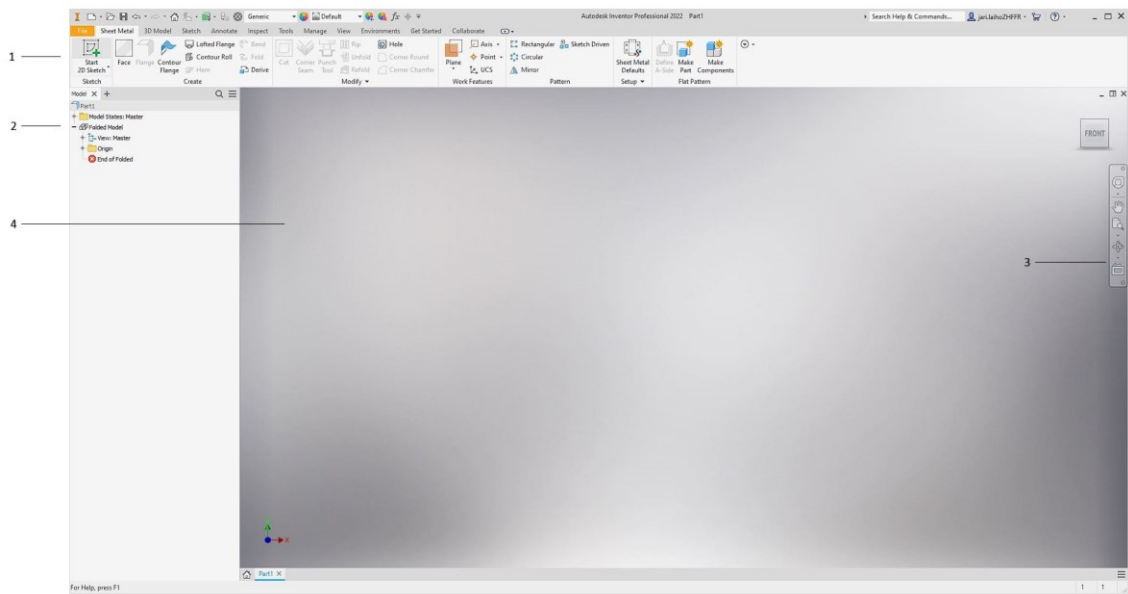


Kuva 2 Solidworksin sovellusikkuna

Solidworksin sovellusikkunan toiminnot:

- 1- Pudotusvalikot
- 2- Työkalupalkki, joka sisältää avaa, uusi tiedosto, tallennus, undo- ja redo-painikkeet
- 3- Task Pane, tehtäväruutu, jossa välilehtiä eri toiminnoille

Inventorin grafiikkaikkuna perustuu välilehdille, joista valitaan haluttu aihepiiri ja ribboneille, jossa kyseisen aihepiirin toimintopainikkeet. Historiapuu on sijoitettu ruudun vasempaan laitaan molemmissa ohjelmissa.

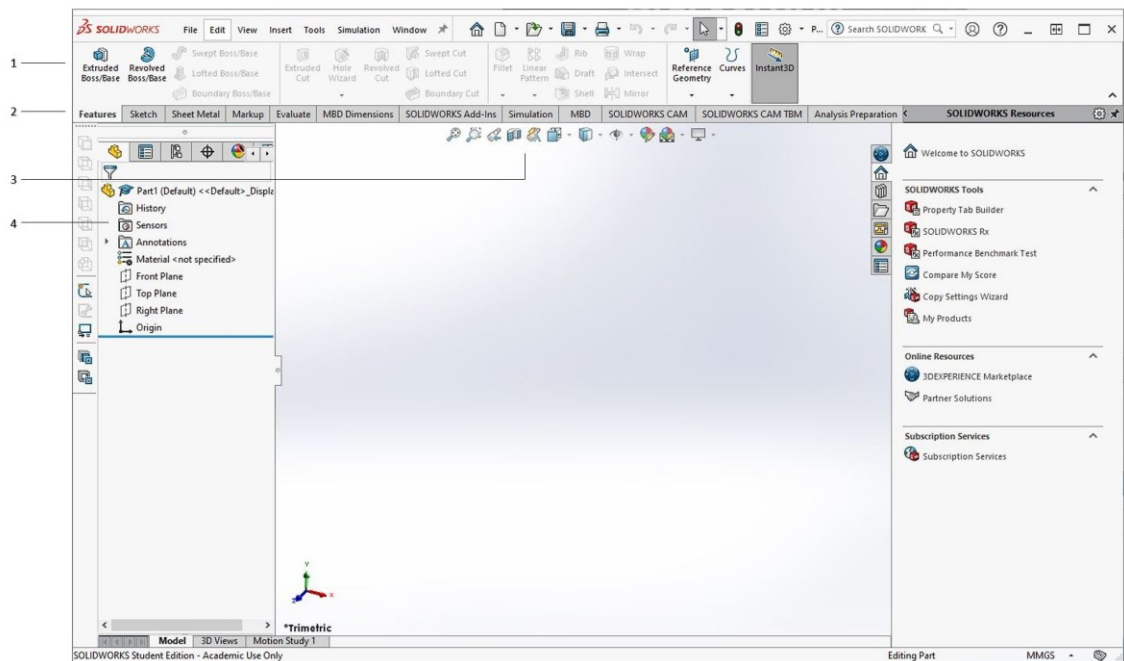


Kuva 3. Inventor grafiikkaikkuna.

Inventorin grafiikkaikkunan paneelit ja painikkeet:

- 1- Ribbon, eli horisontaalinen navigaatiovalikko, jota kutsutaan myös nauha-valikoksi
- 2- Historiapuu, jossa mallinnuksessa käytetyt piirteet kronologisessa järjestyksessä
- 3- Navigaatiovalikko, jossa valinnat kappaleen näkymän säätämiseen
- 4- Grafiikka-alue kappaleen käsittelyä ja mallinnusta varten

SolidWorksin grafiikkaikkuna ei paljoa poikkea Inventorin näkymästä. Verratuna SolidWorksin näkymä-työkalupalkkiin, josta voi valita viidestä vaihtoehdosta, Inventorissa on View-välilehdellä Visual style-valikko, jossa on 11 vakioasetusta graafiselle ulkoasulle.



Kuva 4. Solidworks grafiikkaikkuna.

Solidworksin grafiikkaikkunan paneelit ja painikkeet:

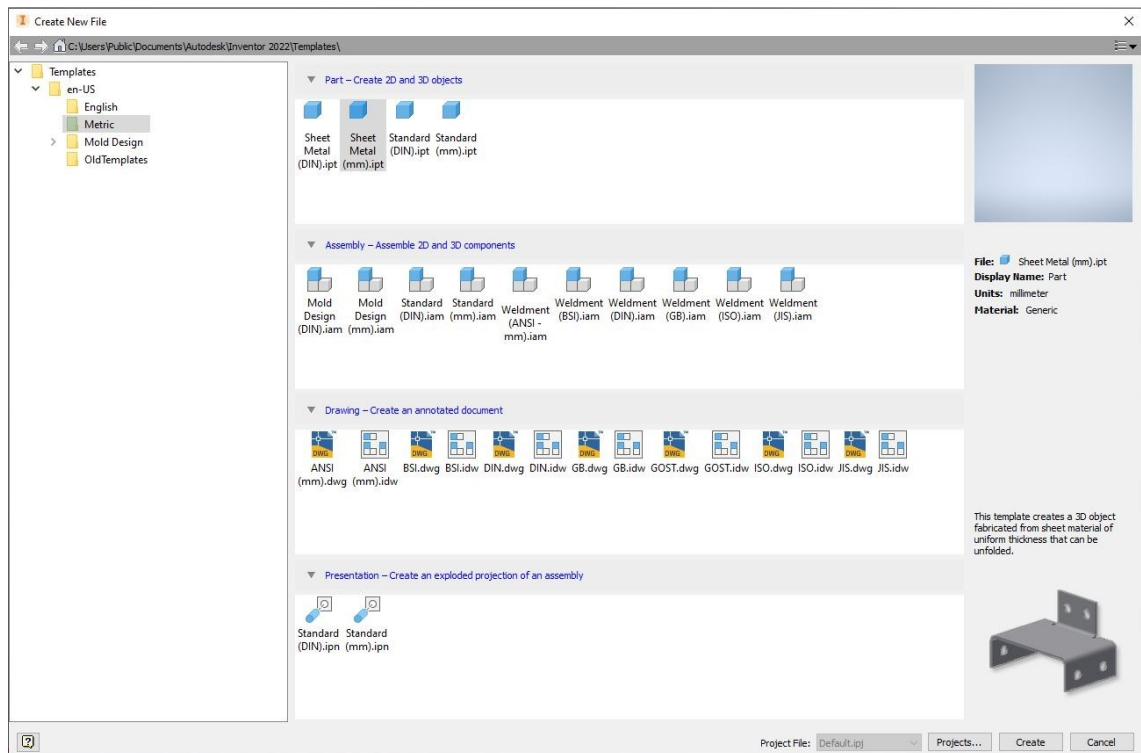
- 1- Ribbon
- 2- Valikko, josta valitaan haluttu välilehti. Välilehden vaihtaminen vaihtaa ribbonin työkalut
- 3- View (Heads-Up) -valikko, josta voidaan säätää näkymäasetuksia, vaihtaa teemoja ja tehdä leikkauksia
- 4- FeatureManager Design Tree, eli historiapuu

Tässäkin ohjelmat ovat erittäin samankaltaiset. Välilehtien nimeäminen poikkeaa, mutta toiminnot ovat kuitenkin lähestulkoon samat.

3.2.2 Mallityypit

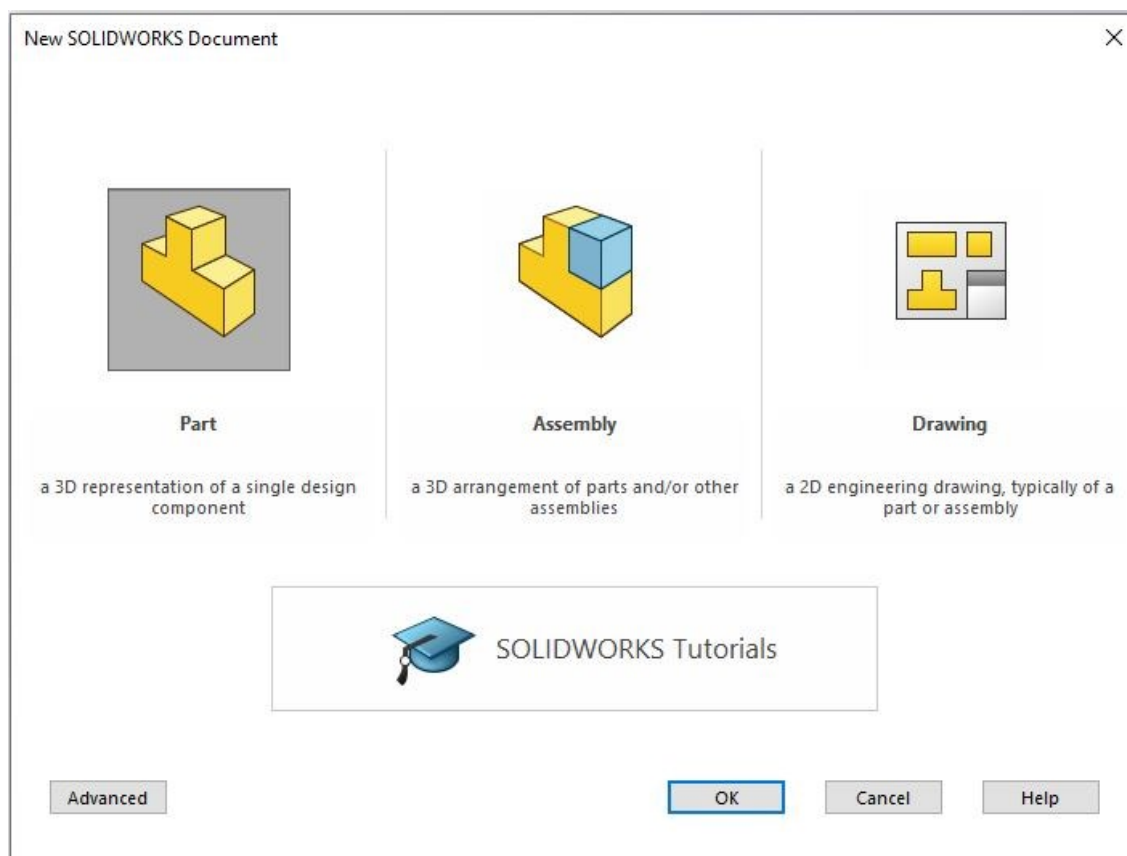
Luodessa uutta dokumenttia Inventorilla, ohjelma tarjoaa laajan valikoiman vaihtoehtoja. Valittavana on standard (vakio-osa), sheet metal (ohutlevymalli), jolloin saa käyttöönsä ohutlevytyökalut, sekä lisäksi DIN-standardin mukaiset mallit. Kokoonpanovaihtoehtoja on myös runsaasti. Valittavana on myös mold

design (valumalli), sekä weldment (hitsausrakenne). Lisäksi on eri standardien mukaisia piirustuspohjia.



Kuva 5. Inventorin mallityypit

Tässä Solidworksin lähestymistapa poikkeaa Inventorista. Solidworks tarjoaa kolme mallipohjaa: Part (osa), Assembly (kokoonpano) ja Drawing (piirustus). Ohutlevytoiminnot saa käyttöönsä Sheet Metal -välilehdeltä ja hitsausrakenteet Insert -valikosta. Nämä saa käyttöönsä normaaliosaa tehdessä, eikä niitä varten tarvitse aloittaa uutta mallia.



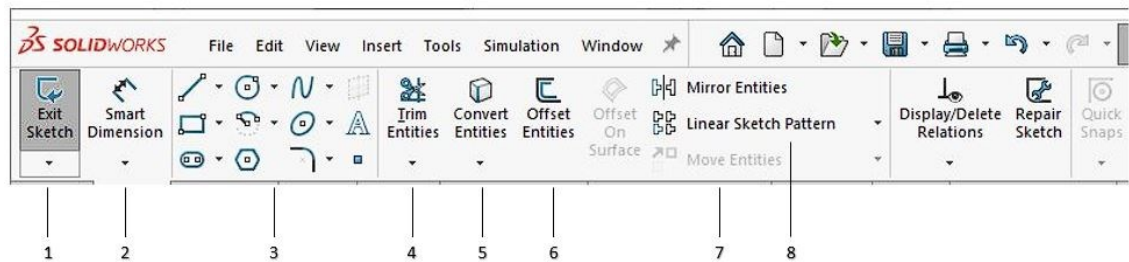
Kuva 6. Solidworks-mallityypit

3.2.3 Sketsaus

Sketsatut piirteet luodaan tasolle muodostetulle sketsille. Taso voi olla jokin kolmesta perustasosta (Front Plane, Top Plane tai Right Plane), tai aputaso (Plane), tai mallinnetun osan tasomainen pinta (Face). Piirtämisen lisäksi geometriaa voidaan luoda myös projisoimalla. Luotava geometria voi piirregeometria tai konstruktio geometria. Konstruktio geometriat ovat piirregeometrian apuna käytettäviä, eikä niitä käytetä piirteiden luomisessa. (Hietikko 2020: 30.)

Solidworksissa sketsaus aloitetaan valitsemalla Sketch (2D-sketsi) ja tämän jälkeen valitsemalla taso, jolle sketsi piirretään. Vaihtoehtoisesti voidaan aloittaa 3D-sketsi, jolloin piirto voidaan aloittaa origosta (piirtoalueen nollapiste), tai mistä tahansa piirtoalueelta. 3D-sketsissä voidaan piirtää mitä tahansa tasoa

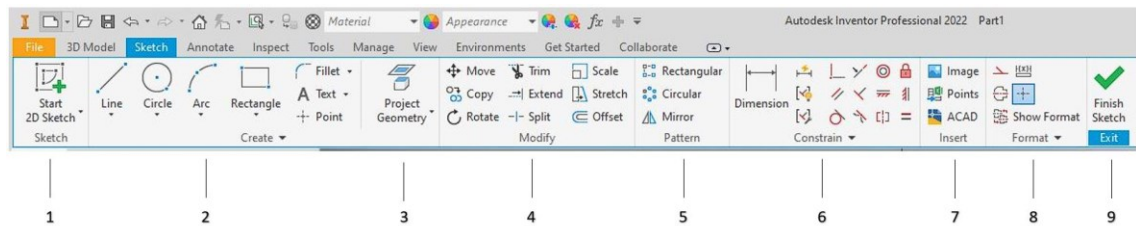
pitkin, jolloin pitää olla tarkkana, että haluttu piirtotaso on aktiivinen. Tab-näppäimellä voi kätevästi vaihtaa piirtotasoa.



Kuva 7. Solidworksin sketsaustyökalut.

- 1- Exit Sketch, sketsistä poistuminen
- 2- Smart Dimension, mitoitustyökalu
- 3- Piirtotyökalut
- 4- Trim Entities, sketsin muokkaustyökalu, jolla leikataan viivoja
- 5- Convert Entities, geometrioiden projisointi sketsiin
- 6- Offset Entities, geometrinen muotojen kopioiminen valitulle etäisyydelle
- 7- Mirror Entities, geometrinen muotojen peilaus valitun suoran suhteen
- 8- Linear Sketch Pattern ja Circular Sketch Pattern, geometrinen muotojen monistus

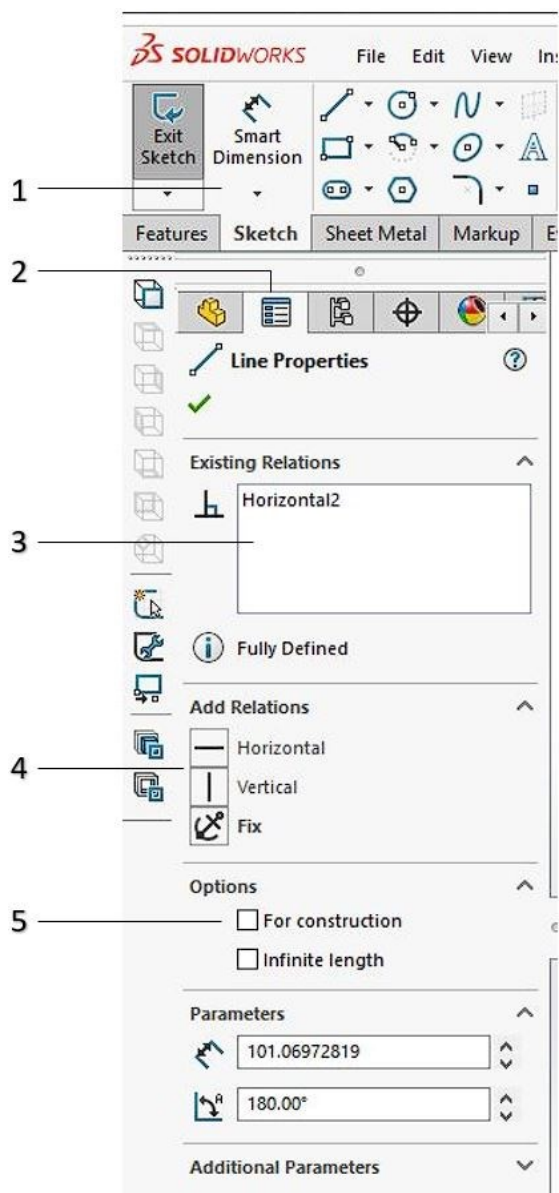
Inventorissa sketsaus aloitetaan samoin kuin Solidworksissa. Sketsipainikkeen pudotusvalikosta löytyy myös 3D-sketch vaihtoehto. Myös sketsauksen kulku noudattaa samaa kaavaa. Inventorin sketsaus poikkeaa Solidworksista geometrian ehtojen määrittelyssä. Inventorissa valitaan ensin geometrinen ehto ja sitten alkio, jota ehto koskee. Inventorin sketsaustyökalut nähdään kuvassa 8.



Kuva 8. Inventorin sketsaustyökalut.

- 1- Start 2D Sketch, uuden sketsin aloitus
- 2- Piirtotyökalut
- 3- Project Geometry, geometrian projisointi kappaleesta sketsiin
- 4- Modify, sketsin muokkaustyökalut
- 5- Pattern, geometrysten muotojen monistustyökalut
- 6- Constrain, työkalut geometrysten ehtojen määrittelyyn
- 7- Insert, kuvan, pisteiden ja AutoCAD-tiedoston tuominen sketsiin
- 8- Format, konstruktiogeometrian valinta, keskiviivan ja ympyrän keskipisteen määrittely
- 9- Finish Sketch, sketsistä poistuminen

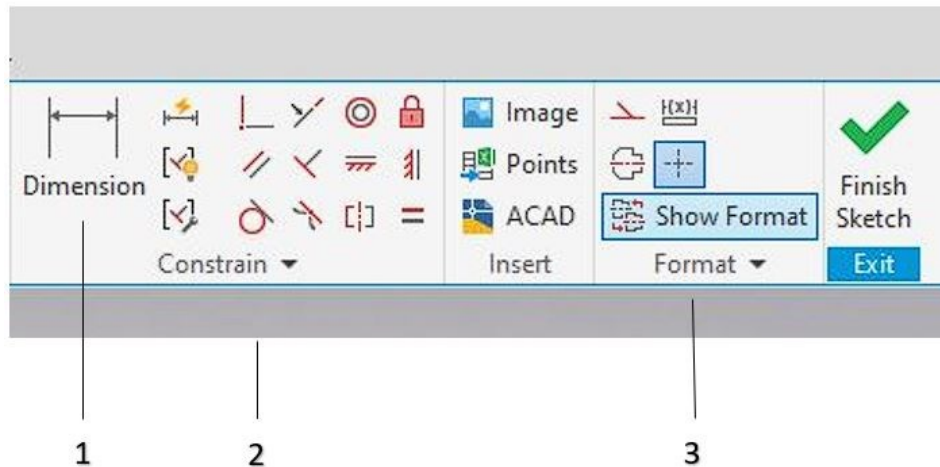
Molemmat ohjelmat ehdottavat automaattisesti geometrisia ehtoja, kuten kohtisuoruutta piirtoakselien suhteen. Näiden lisäksi ehtoja voidaan lisätä painamalla ctrl-näppäintä ja valitsemalla alkioit ja sen jälkeen halutut ehdot valikosta. Solidworksissa valikko löytyy Property Managerista, joka aktivoituu alkion valinnan jälkeen. Ohjelma näyttää alkiolle tai alkiojoukolle sopivat ehdot ja jo olemassa olevat ehdot kohdassa Existing Relations (kuva 9).



Kuva 9. SolidWorksin geometristen ehtojen asettaminen.

- 1- Smart Dimension, mitoitustyökalu
- 2- Property Manager -välilehti
- 3- Existing Relations, alkion/alkioiden jo olemassa olevat ehdot
- 4- Add Relations, lisää ehtoja
- 5- Options, valinnat, konstruktiogeometria ja ääretön pituus

Inventorissa geometriset ehdot löytyvät Constraint-ribbonista ja ehto voidaan valita ennen alkioita tai alkiodien valinnan jälkeen (kuva 10).



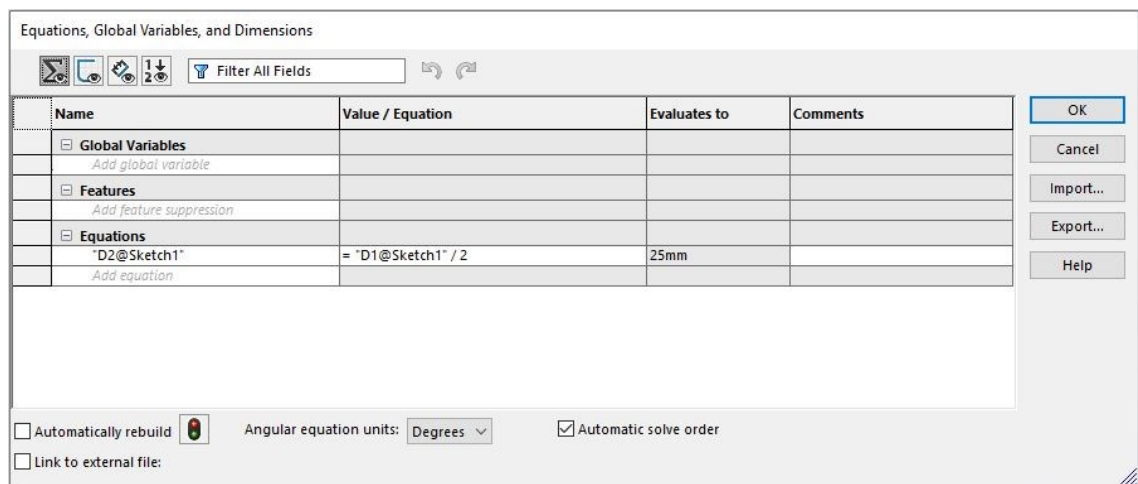
Kuva 10. Inventor geometriset työkalut

- 1- Dimension, mitoitustyökalu
- 2- Constrain, geometriset ehdot
- 3- Format, konstruktiogeometriat

Piirremallinnusohjelman parametriikan toimivuuden vuoksi, tulisi sketsin olla yksiselitteisesti ja täydellisesti määritelty. Mittojen ja ehtojen muodostama kokonaisuus tulee olla sellainen, joka sallii sketsin muodon muuttumisen hallitusti mittoja muutettaessa. Sketsin tulisi aina olla täysin määritelty. (Hietikko 2020, 32.)

SolidWorksissa täysin määritellyn sketsin alkioit muuttuvat mustaksi ja kuvaruudun alaosaan palkkiin tulee Fully Defined-teksti. Inventorissa alkioit ovat aluksi mustia ja muuttuvat sinisiksi, kun sketsi on täysin määritelty. Alapalkin koordinaattikenttään tulee teksti: Fully Constrained.

Sketsien mitoitukseen voidaan luoda riippuvuuksia matemaattisten kaavojen avulla. Yksinkertaisimmillaan riippuvuus voi olla yhtäsuuruus, mutta myös monimutkaisemmat kytkennät ovat mahdollisia. Solidworks tallentaa jokaisen mitan Equations-, Global Variables- and Dimensions-valintaikkunaan, jonka voi avata Tools-valikosta, tai historiapuusta, Equations-kohdasta. Mitat saavat uniikin tunnisteen, jossa juokseva numero sekä viittaus sketsiin, jossa mitta sijaitsee. Kuvassa 11. mitta D2 on sidottu mittaan D1 yhtäsuuruusehdolla.



Kuva 11. Solidworks Equations -valintaikkuna

Inventor tallentaa parametrit Parameters-tilukoon, joka löytyy manage-välileheltä. Mitat saavat juoksevan numeron ja taulukko kertoo missä sketsissä kyseinen parametri esiintyy (kuva 12).

Parameters

Parameter Name	Consumed by	Unit/Type	Equation	Nominal Value	Tol.	Model Value	Key		Comment
Model Parameters									
d0	d1, Sketch1	mm	50 mm	50,000000	●	50,000000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
d1	Sketch1	mm	$d0 / 2$ ul	25,000000	●	25,000000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
User Parameters									

Immediate Update

Reset Tolerance:

Kuva 12. Inventor Parameters -taulukko

Parametritaulukon tuonti ja vienti onnistuu Inventorissa xml-muodossa. SolidWorksissa tämä onnistuu ainoastaan tekstimuodossa.

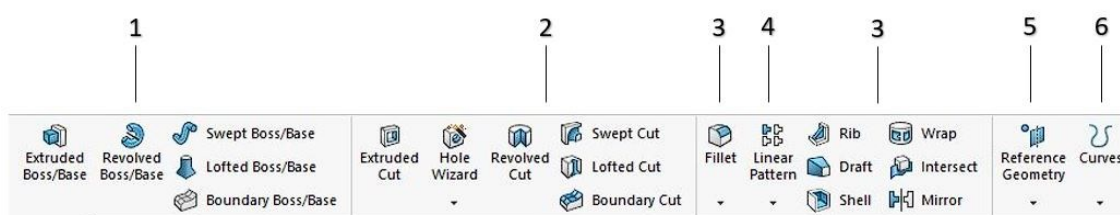
3.2.4 Piirteet

Part (osa) koostuu yksilöllisistä piirteistä. Ensimmäinen luotu piirre on peruspiirre. Tämän pohjalle luodaan muut piirteet. Peruspiirre on yleensä pursotus, mutta se voi olla mikä tahansa sketsattu piirre. SolidWorksissa piirteet luokitellaan kahteen tyyppiin: sketsatut ja sijoitetut piirteet. Sketsatut piirteet perustuvat nimensä mukaisesti sketsattuun geometriaan. Sijoitetut piirteet, kuten Chamfer (viiste) ja Fillet (pyöristys) sijoitetaan suoraan malliin. SolidWorksin piirteet lisätään aina malliin riippumatta siitä lisäävätkö vai poistavatko ne materiaalia. (Feature based models 2021.)

Mikä tahansa alkio voidaan määritellä konstruktiogeometriaksi Solidworksissa. Pisteet ja keskiviivat ovat aina ainoastaan konstruktiogeometrioita. Keskiviivaa voidaan käyttää pyörähdysakselina pyörähdyspiirteen luomiseen tai sketsin peilaamiseen. (Constuction Entities 2021.)

Referenssigeometria määrittelee pinnan tai solidin muodon. Referenssigeometrioihin kuuluvat tasot, akselit, koordinaattisysteemit ja pisteet. Referenssigeometrioita käytetään useiden piirteiden luomisessa. (Reference Geometry 2021.)

SolidWorksin piirretyökalut löytyvät Features-välilehdeltä ja ne ovat jaoteltu neljään ryhmään: materiaalia lisäävät, materiaalia poistavat, sijoitetut piirteet, sekä referenssigeometriat ja käyrät (kuva 13).

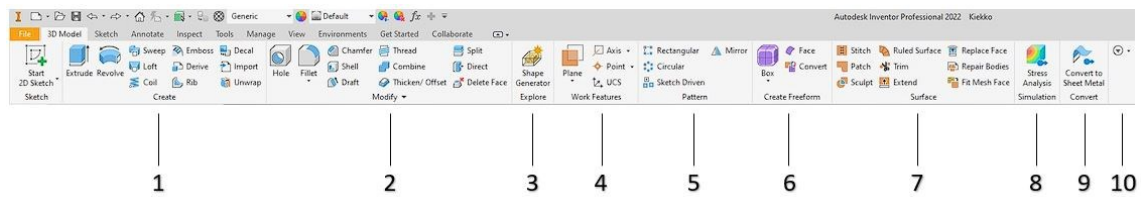


Kuva 13. Solidworks-piirretyökalut

- 1- Materiaalia lisäävät piirteet
- 2- Materiaalia poistavat piirteet
- 3- Sijoitetut piirteet
- 4- Piirteiden monistustyökalut
- 5- Referenssigeometriat
- 6- Curves, työkalut käyrien luomiseen

Inventorissa piirteet jaetaan kolmeen tyyppiin: apupiirteet, sketsatut piirteet ja sijoitetut piirteet. Apupiirteet ovat konstruktiogeometrioita, joita käytetään, kun tavallinen geometria on riittämätön luomaan ja paikoittamaan uusia piirteitä. Sketsatut ja sijoitetut piirteet lisäävät yksityiskohtia peruspiirteeseen ja ne paikoitetaan suhteessa toisiinsa käyttäen mitoitusta tai geometria rajoitteita. (About Part Features 2021.)

Inventorin piirretyökalut löytyvät 3D Model-välilehdeltä. Lisäksi ribbonilla on muita työkaluja, kuten Shape Generator, jolla voi optimoida osan geometriaa poistamalla siitä materiaalia.



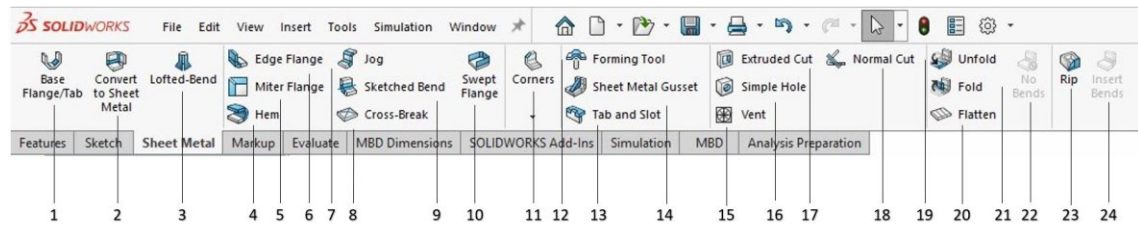
Kuva 14. Inventorin piirrettyökalut

- 1- Create, sketsatut piirteet
- 2- Modify, sijoitetut piirteet
- 3- Shape Generator, lujuuden optimointityökalu
- 4- Work Features, apupiirteet
- 5- Pattern, piirteiden monistustyökalut
- 6- Create Freeform, osan geometrian muokkaustyökalut
- 7- Surface, pintamallinnustyökalut
- 8- Simulation, lujuusanalyysi
- 9- Convert, konvertointi ohutlevytmalliksi

3.2.5 Ohutlevymallinnus

Tavallisista osista poiketen, ohutlevyosat valmistetaan kauttaaltaan yhtä pak-susta litteästä materiaalista. Levy muokataan lopulliseen muotoonsa käyttä-mällä erilaisia valmistusmenetelmiä. Ohutlevytyökaluilla voidaan luoda taivutettu malli, josta voidaan tehdä levityskuva. Levityskuvaa käytetään yleensä kappaleen yksityiskohtaiseen valmistukseen. (Sheet metal parts 2021.)

Solidworksin ohutlevytyökalut löytyvät Sheet Metal-välilehdeltä. (kuva 15).

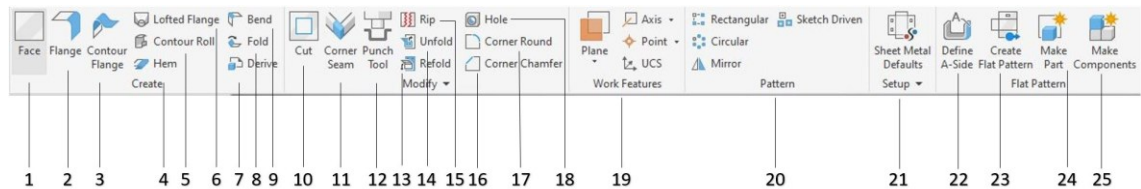


Kuva 15. Solidworks Sheet Metal-ribbon

- 1- Base Flange/Tab, ohutlevymallin ensimmäinen piirre, luodaan sketsistä
- 2- Convert to Sheet Metal, konvertoi tilavuusmallin ohutlevymalliksi
- 3- Lofted-Bend, luo ohutlevymallin kahdesta avoimesta, päällekkäisestä sketsistä
- 4- Hem, levyn päädyn taivutus
- 5- Miter Flange, luo sarjan taivutuksia ohutlevyosan särmästä
- 6- Edge Flange, lisää taivutuksen levyosan särmästä
- 7- Jog, luo kaksi taivutusta sketsatusta viivasta
- 8- Cross-Break, luo graafisen esityksen ohutlevyosan jäykisteestä
- 9- Sketched Bend, luo olemassa olevan ohutlevyosan tasopinnalle luodusta sketsistä taivutuksen
- 10-Swept Flange, luo taivutukset sketsistä sweep-toimintoa käyttäen
- 11-Corners, useita nurkkien käsittelyjä, nurkkahelpotus
- 12-Forming Tool, taivuttaa tai venyttää ohutlevyosaa käyttämällä osaa
- 13-Tab and Slot, luo yhteensopivan aukon ja kiinnikkeen kahteen osaan, joilla osat saadaan kiinnitettyä toisiinsa
- 14-Sheet Metal Gusset, jäykisteen luominen
- 15-Vent, aukkojen luominen ohutlevyosaan
- 16-Simple Hole, yksinkertaisen reiän luominen
- 17-Extruded Cut, leikkaava pursotus
- 18-Normal Cut, suoristaa reiät ja aukot tason mukaan
- 19-Unfold, ohutlevyosan valittujen taivutusten levitys
- 20-Flatten, ohutlevyosan kaikkien taivutusten levitys, luo Flat Patternin
- 21-Fold, levitetyn ohutlevyosan takaisin taivutus
- 22-No Bends, poistaa kaikki taivutukset ohutlevyosasta
- 23-Rip, luo raon kahden reunan väliin
- 24-Insert Bends, luo ohutlevymallin osasta

SolidWorksin ohutlevymallinnuksen parametrejä hallitaan piirrepuussa sijaitsevasta Sheet Metal -piirteestä.

Inventorin ohutlevytyökalut saa esiin aloittamalla uuden Sheet Metal-osan, tai 3D Model -välilehdeltä valitsemalla Convert To Sheet Metal. Tämä tuo esiin Sheet Metal-ribbonin (kuva 16).



Kuva 16. Inventor Sheet Metal-ribbon

- 1- Face, luo ohutmetalliosan peruspiirteen
- 2- Flange, lisää taivutuksen särmästä
- 3- Contour Flange, luo ohutlevymallin avoimesta sketsistä
- 4- Hem, levyn päädyn taivutus
- 5- Contour Roll, taivuttaa profiilin akselin ympäri luoden valssatun muodon
- 6- Lofted Flange, luo ohutlevymallin kahden sketsin välille
- 7- Derive, toisesta kappaleesta johdettu uusi kappale
- 8- Fold, kappaleen taivutus sketsatun viivan mukaan
- 9- Bend, luo piirteen, joka yhdistää kaksi irtonaista tasopintaa
- 10-Cut, poistaa materiaalia sketsatun profiilin mukaisesti
- 11-Corner Seam, määrittelee tai luo raon kahden pinnan väliin, määrittelee nurkkahelpotuksen
- 12-Punch Tool, lävistystyökalu, jolla voidaan tehdä upotuksia ja lävistyksiä
- 13-Refold, palauttaa levitetyn kappaleen taivutukset
- 14-Unfold, levittää taivutetun kappaleen
- 15-Rip, poistaa materiaalia ohutlevyosasta, jotta levitys olisi mahdollista
- 16-Corner Chamfer, luo viisteitä
- 17-Corner Round, luo pyöristyksiä
- 18-Hole, reikätyökalu
- 19-Work Features, apupiirteet

- 20-Pattern, monistustyökalut
- 21-Sheet Metal Defaults, ohutlevykappaleen parametrien määrittely
- 22-Define A-Side, määrittelee ohutlevyosan a-pinnan lävistystyökalua varten
- 23-Create Flat Pattern, osan levitys, luo Flat Patternin
- 24-Make Part, luo osan valituista layout-objekteista
- 25-Make Components, luo osia blokeista tai solid-mallista

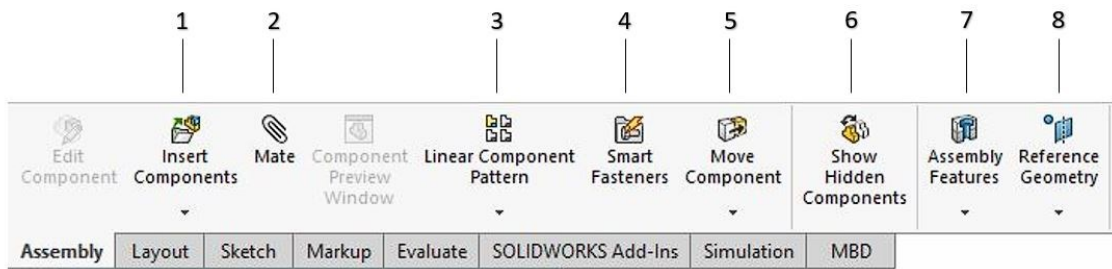
Inventorin ohutlevymallin parametrejä hallitaan Sheet Metal Defaults-toiminnolla.

3.2.6 Kokoonpanot

Kokoonpanon muodostamiseen on kolme eri tapaa: Bottom-Up, Top-Down ja Hybrid. Bottom-Up menetelmää käyttäessä osat mallinnetaan ennen kokoonpanovaihetta ja sitten sijoitellaan kokoonpanoon. Top-Down menetelmässä osat mallinnetaan kokoonpanoon suoraan oikeille paikoilleen. Menetelmän etuna on se, että kokoonpanossa olevia osia voi käyttää avuksi mallinnuksessa. Yleisimmin käytetyin tapa on Hybrid, joka on Bottom-Up ja Top-Down-menetelmien yhdistelmä, jossa voidaan käyttää kumpaakin menetelmää.

SolidWorksissa osat sidotaan toisiinsa ehdoilla (Mate). Ehdot sitovat esimerkiksi kaksi pintaa toisiinsa (Coincident), jolloin pinnat koskettavat toisiansa. (Hietikko 2020, 52.)

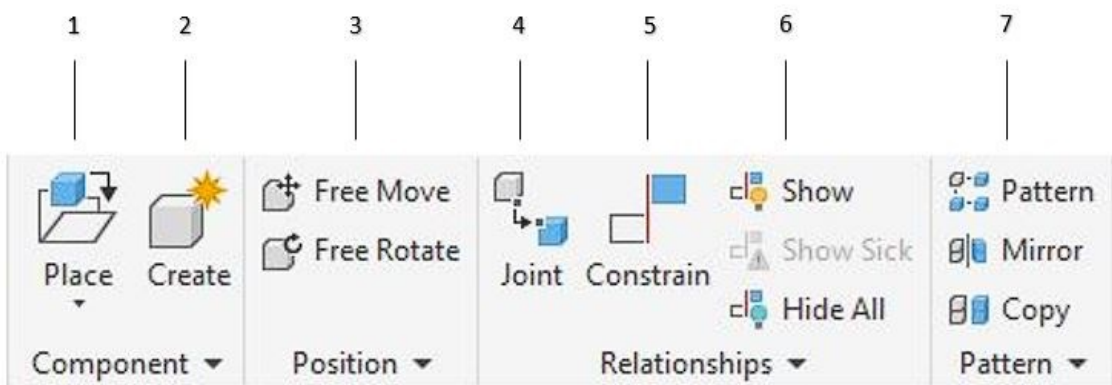
Kuvassa 17 SolidWorksin Assembly ribbonin työkalut.



Kuva 17. SolidWorksin kokoonpanotyökalut

- 1- Insert Components, osien tuominen kokoonpanoon
- 2- Mate, ehtojen asettaminen
- 3- Linear Component Pattern, alavetovalikko, josta löytyvät osien ja kokoonpanojen monistustyökalut
- 4- Smart Fasteners, kiinnitystarvikkeiden automaattinen tuonti standardin mukaisiin reikiin
- 5- Move Component, osien hallittu siirtäminen ja pyörittäminen ehtojen sallimissa vapausasteissa
- 6- Show Hidden Components, näyttää väliaikaisesti piilotetut komponentit
- 7- Assembly Features, kokoonpanoon lisättävät piirteet
- 8- Reference Geometry, kokoonpanoon lisättävät referenssigeometriat

Inventorin Assemble-välilehdeltä saa käyttöönsä kokoonpanotyökalut. (kuva 18).



Kuva 18. Inventorin kokoonpanotyökalut

- 1- Place, komponentin lisääminen kokoonpanoon
- 2- Create, uuden osan luominen kokoonpanoon
- 3- Position, työkalut komponenttien liikutteeluun
- 4- Joint, nivelen ehtojen määrittely
- 5- Constrain, ehtojen määrittely
- 6- Ehtojen tarkastelu
- 7- Pattern, monistustyökalut

Kokoonpanojen ehdot määrittelevät komponenttien orientaation ja paikan kokoonpanossa, ja simuloivat komponenttien välisiä mekaanisia suhteita. Jokaisella komponentilla, jota ei ole sidottu ehdoilla, on kuusi vapausastetta. Komponentti voi pyöriä ja liikkua x-, y-, ja z-akseleilla. Kun kappaleelle asetetaan rajoite, poistaa se yhden tai useamman vapausasteen. Kun kaikki vapausasteet ovat poistettu, on kappale täysin määritelty. (Assembly Constraints 2021.)

Solidworksissa on määriteltyjä mate-tyyppejä kolmella välilehdellä. Standardvälilehdeltä löytyvät perustyökalut:

- 1- Coincident, pisteen sitominen alkioon
- 2- Parallel, yhdensuuntaisuus
- 3- Perpendicular, kotisuoruus
- 4- Tangent, alkion sitominen tangentin suuntaisesti kaareen tai ympyrään
- 5- Concentric, kahden ympyrän tai kaaren samankeskisyys
- 6- Lock, lukitsee osan paikoilleen ilman ehtoja
- 7- Etäisyys, sitoo kappaleen tietylle etäisyydelle
- 8- Kulma, määrittelee kahden objektin välisen kulman

Advanced-välilehdeltä löytyy lisää mate-vaihtoehtoja:

- 1- Profile Center, sitoo kaksi neliö- tai ympyräprofiilia niiden keskipisteiden mukaan
- 2- Symmetric, kahden alkion symmetrinen sitominen tasoon nähden

- 3- Width, kahden tasopinnan sitominen kahden tasopinnan väliin
- 4- Path Mate, valitun pisteen sitominen määriteltyyn polkuun
- 5- Linear/Linear Coupler, sitoo kahden komponentin translaatiot

Mechanical-välilehdellä on mekaaniset mate-valinnat:

- 1- Cam, tangentiaalinen sitominen pintaan, kuten kampiakseli
- 2- Slot, ruuvikiinnitysura
- 3- Hinge, sarana
- 4- Gear, hammasvaihde
- 5- Rack Pinion, hammastanko ja ratas
- 6- Screw, ruuvi
- 7- Universal Joint, yleismallinen nivel

Inventorin rajoitteet asetetaan Constrain-painikkeesta avautuvasta Place Constraint-ikkunasta. Assembly välilehdellä ovat tavallisimmat tyypit:

- 1- Mate, sitoo kaksi tasoa yhdensuuntaiseksi
- 2- Angle, asettaa kahden komponentin välille kulmaehdon
- 3- Tangent, asettaa tangentiaalisen ehdon kahden komponentin välille
- 4- Insert, asettaa aksiaalisen ja tasoehdon samalla toiminnolla
- 5- Symmetry, asettaa kaksi komponenttia symmetrisesti tasoon nähden

Motion-välilehdellä löytyvät rotaatio ja rotaatio/translaatiovaihtoehdot. Rotaatioehto sitoo kaksi ympyrän muotoista kappaletta niin, että ne pyörivät toisiinsa nähden kuin hammaspyörät. Rotaatio/translaatioehto taas sitoo ympyrän muotoisen kappaleen tasomaiseen kappaleeseen, kuten hammastanko.

Transitional-välilehdellä on ainoastaan yksi ehto, transitional. Tällä voidaan sitoa ympyrän muotoinen pinta tangentiaalisesti jatkuvaan pintojen sarjaan. Kappale voi liikkua muissa vapausasteissa.

Constraint Set -välilehdellä sijaitseva UCS to UCS -ehto sitoo kaksi käyttäjän määrittelemää koordinaatistoa toisiinsa.

3.2.7 Ominaisuuksien vertailu

Ohjelmien käyttöliittymät ovat hyvin samankaltaiset. Kummassakin on käytössä ribbon-nauhavalikot. Käyttölogiikka on myös yhteneväinen. Kumpikin ohjelma toimii niin, että ensin avataan joko osa, kokoonpano, tai piirustus. Inventorissa voi aloittaa suoraan ohutlevy- tai muottiprojektin, jolloin työkalut ovat valmiina. Inventorin mallityyppien valikoima on laaja, ja on kätevää luoda uusi dokumentti haluamallaan standardin mukaisilla esiasetuksilla.

Sketsaus tapahtuu molemmissa ohjelmissa samalla tavalla. Toiminnot ovat selkeät ja kaikista toiminnoista löytyy kuvaus hiiren osoittimen ollessa painikkeen kohdalla. Piirron aikana kumpikin ohjelma ehdottaa automaattisesti kohtisuoruusehtoja. Geometristen ehtojen lisäämisessä piirron jälkeen ohjelmat poikkeavat. Solidworks antaa listan mahdollisista ehdoista, joita voi käyttää valittujen alkoiden sitomiseen, kun taas Inventorissa ehto valitaan aina itse.

Parametrien ja kaavojen käyttäminen on yhteneväistä ohjelmien välillä. Ainoana merkittävänä erona Inventorin ominaisuus, joka mahdollistaa xml-tiedostomuodon käyttämisen parametritaulukoiden tuomiseen ja viemiseen.

Molemmat ohjelmat sisältävät laajan valikoiman erilaisia piirretyökaluja. Inventorin piirretyökalut sijaitsevat 3D Model -välilehden nauhavalikossa, kun taas SolidWorksissa nauhavalikossa ovat ainoastaan yleisimmin käytetyt työkalut. Kaikki työkalut voidaan avata Insert-pudotusvalikosta. Molemmista ohjelmista löytyvät:

- Sketsatut piirteet
- Sijoitetut piirteet
- Apupiirteet
- Piirteiden monistustyökalut

- Pintamallinnustyökalut
- Ohutlevytyökalut
- Lujuusanalyysi
- Hitsausrakenteet

Piirretyökalut ovat SolidWorksissa jäsennelly selkeästi ja jokaisessa toiminnossa on joko toimintoa kuvaava teksti, kuva, tai animaatio. Nauhavalikkoon on valittu yleisimmin käytettävät toiminnot. Insert-alasvetovalikosta löytyvät ohjelman kaikki käytettävissä olevat piirretyökalut. Inventorin piirretyökalut ovat 3D model-ribbonilla, poislukien ohutlevy-työkalut, jotka sijaitsevat omalla ribbonillaan. Työkalujen kuvakkeesta löytyy toimintoa kuvaava teksti, sekä kuva. Tämä tekee työkalujen käyttämisestä helppoa ja vaivatonta, vaikka käyttäjä ei olisi kokenut Inventor-mallintaja.

Ohutlevytyökaluja ohjelmista löytyy runsaasti. Ohutlevytyökaluihin ei tässä työssä paneuduttu kuin pintapuolisesti.

Kokoonpanojen muodostaminen tapahtuu molemmissa ohjelmissa käytännössä samalla tavalla. Solidworksissa voi myös käyttää toimintoa Make Assembly From Part, jolloin ohjelma luo kokoonpanodokumentin. Komponenttien sitominen poikkeaa siltä osin, että Solidworksin työkaluvalikoima ehtojen lisäämiseen on huomattavasti laajempi, sisältäen edistyneempiä mekaanisia liitäntöjä. Inventorissa mekaaniset liitännät tehdään Joint-valikon kautta. Tällöin ehdot toimivat myös liikeanalyysissä.

3.3 Mallinnettavat kappaleet

Tässä työssä oli tarkoitus vertailla mallinnuksen kulkua ja mallinnukseen tarvittavia toimintoja kummallakin ohjelmalla, mallintamalla BMW B58 -moottorin mäntä, kiertokanki, männäntappi, sekä sokka ja muodostaa osista kokoonpano. Mallinnettava kokonaisuus on esimerkki tavanomaisesta mallinnustehtävästä mekaniikkasuunnittelussa, jossa tarvitaan monipuolisesti erilaisia mallinnustyökaluja (kuva 19).



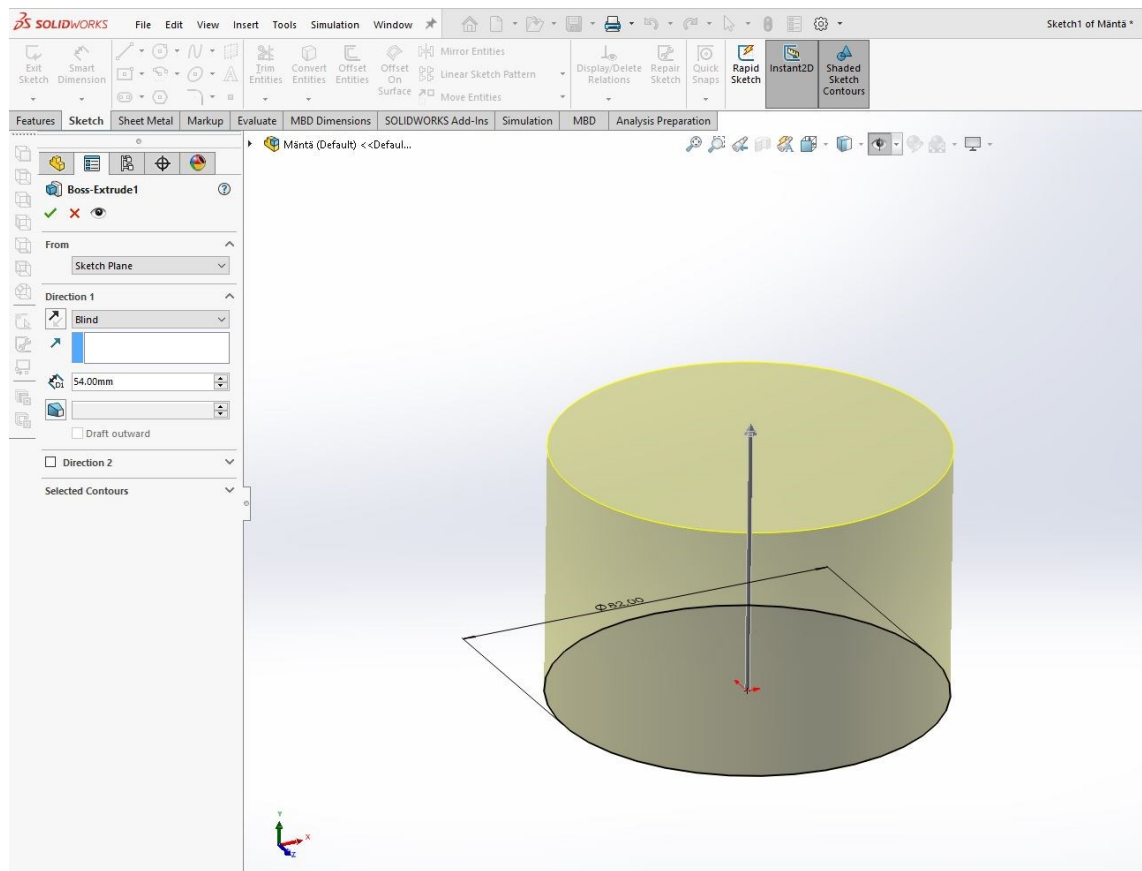
Kuva 19. Inventorilla mallinnettu männän kokoonpano

3.4 Mallinnuksen kulku SolidWorksilla

Tässä luvussa käsitellään kappaleiden mallinnuksen vaiheita.

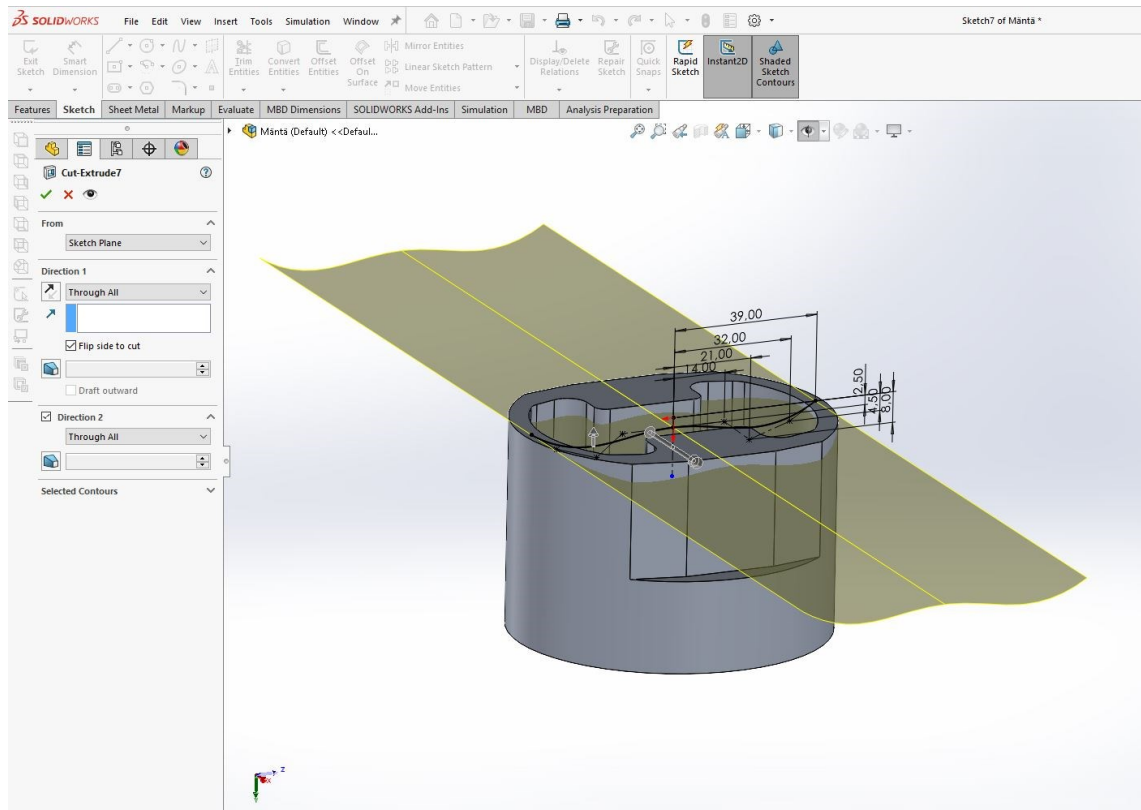
3.4.1 Mäntä

Aluksi sketsattiin 82 mm halkaisijaltaan oleva ympyrä ja pursotettiin käyttäen Boss-Extrude-komentoa (kuva 20).



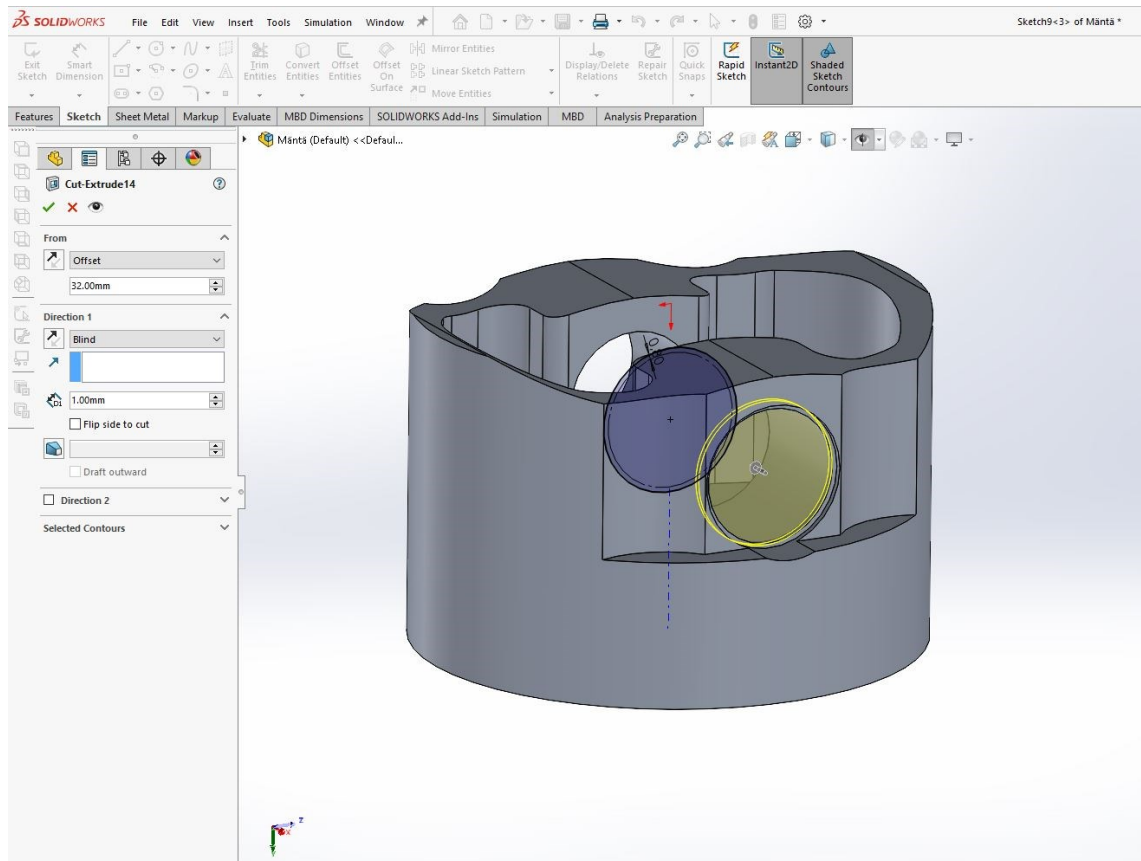
Kuva 20. Boss-Extrude, eli pursotus on Solidworksin perustyökaluja

Seuraavaksi sketsattiin männän sisäpuolen muoto ja leikattiin Extruded-Cut-toimintoa käyttäen mäntä ontoksi. Samalla tavalla tehtiin ulkopuolen muoto. Männän alapintaan saatiin halutun muotoiseksi sketsaamalla ensin muoto käyttäen Style Spline -viivan piirtoa. Tämän jälkeen leikattiin muoto (kuva 21).



Kuva 21. Spline-viiva täysin määriteltynä mitoituksella

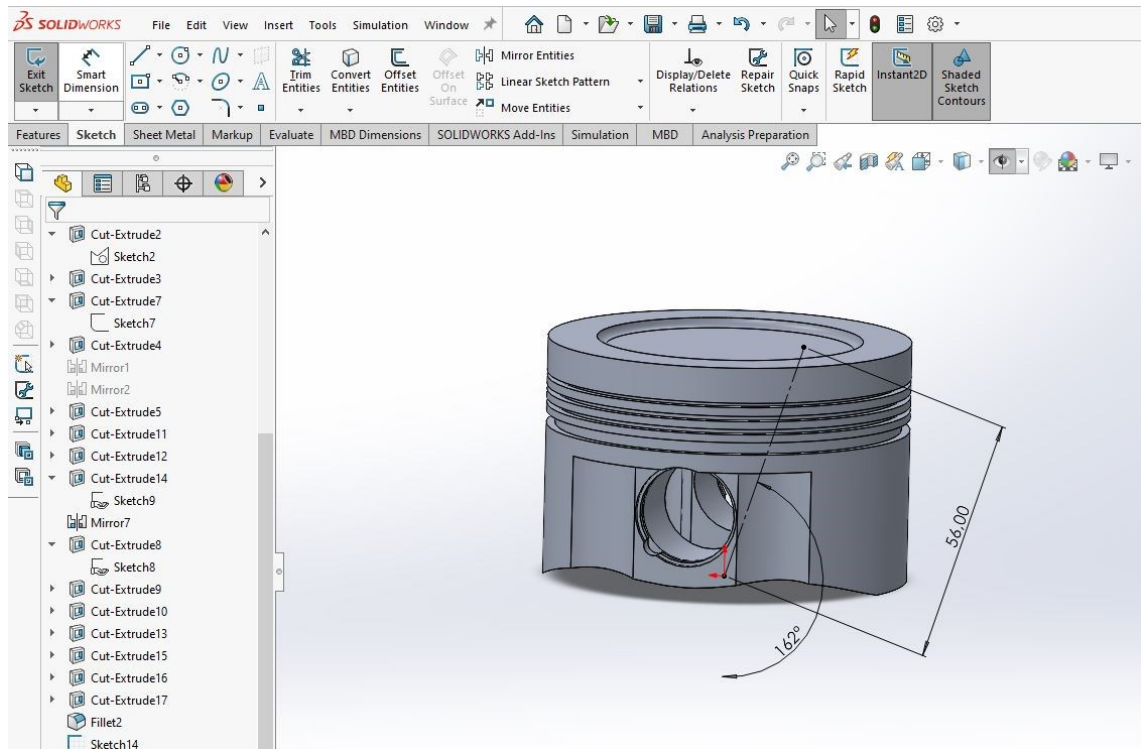
Seuraavassa vaiheessa sketsattiin männäntapin muoto ja siihen liittyvät upotukset, sekä kiinnityssokan ura. Uran sketsi voitiin tehdä Right Plane -perustasolle ja leikata ura 32 mm päässä tasosta. Tällä välttyttiin aputason luomisesta, joka säästi aikaa (kuva 22).



Kuva 22. SolidWorksilla voidaan käyttää Offset-asetusta, jolloin piirre alkaa halutun mitan päästä sketsistä

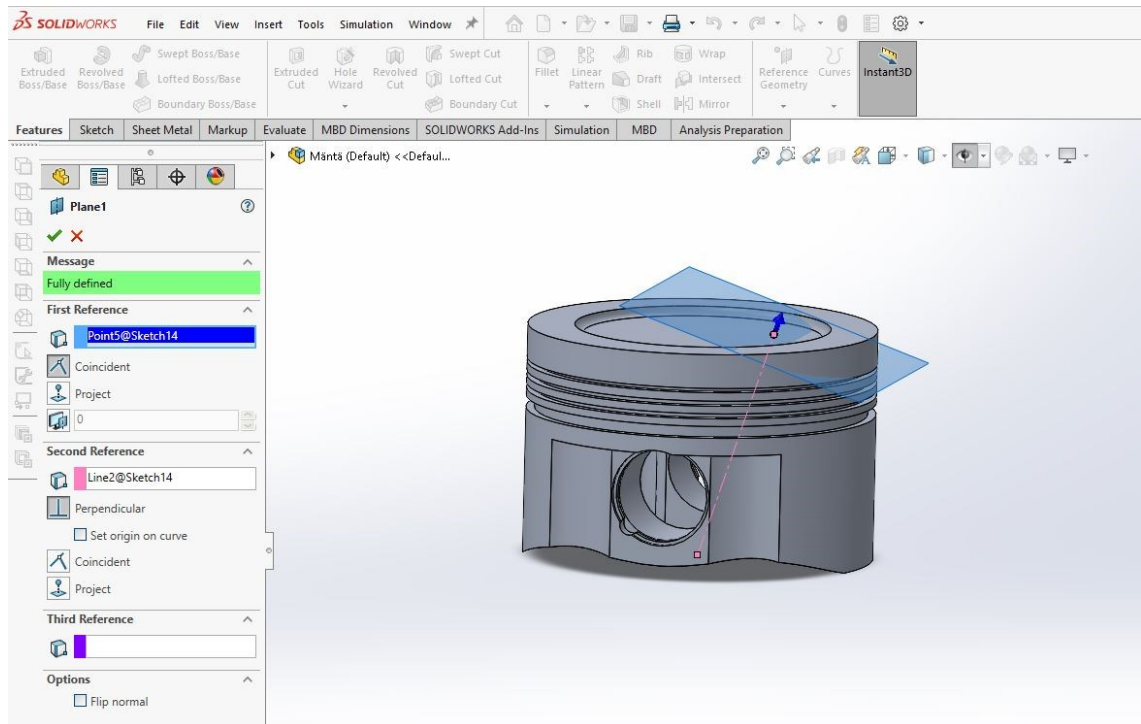
Männän päähän tehtiin palotilan upotus, sekä urat männänrenkaille. Männänrenkaissa toistuu sama muoto ja ainoastaan urien paksuus vaihtelee renkaiden mukaan. Tällöin on kätevää käyttää samaa sketsiä ja aloittaa leikkaus halutulta syvyydeltä.

Venttiilien upotuksia varten luotiin aputaso. Tätä varten luotiin sketsi, jolla määriteltiin aputason paikka ja orientaatio (kuva 23).



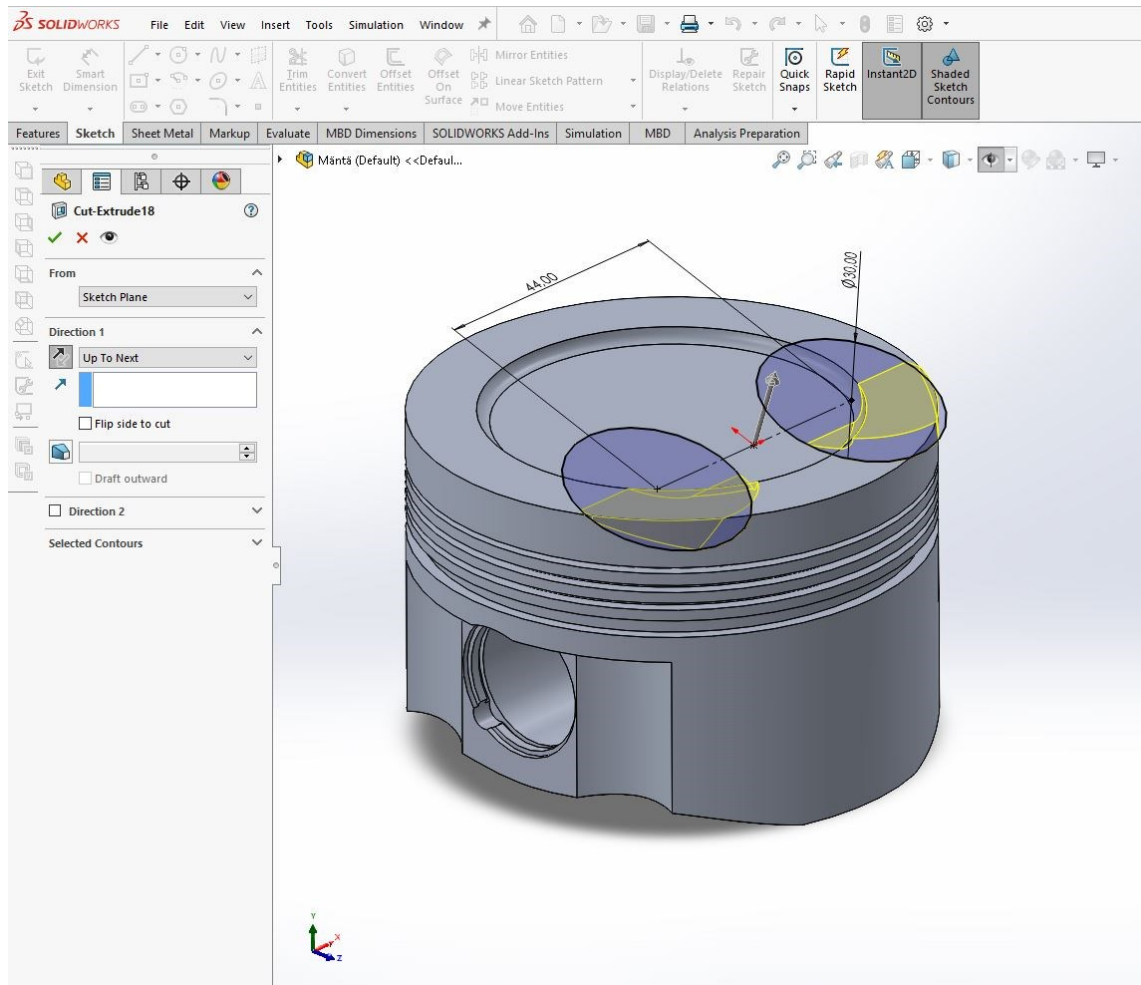
Kuva 23. Sketsi, jolla määritellään aputaso

Aputaso voidaan määrittellä SolidWorksissa usealla tavalla. Tässä viivan avulla siten, että viivan päässä oleva piste sijaitsee tasolla, ja taso on kohtisuoraan viivaan nähden (kuva 24).



Kuva 24. Aputaso määriteltynä sketsin pisteen ja viivan avulla

Aputasolle luotiin uusi sketsi upotuksia varten ja leikattiin upotukset Cut-Extrude-toimintoa käyttäen (kuva 25). Kappaleen ollessa symmetrinen, voitiin upotukset peilata toiselle puolelle Mirror-toimintoa käyttäen. Lopuksi luotiin pyöristykset Fillet-toiminnolla.



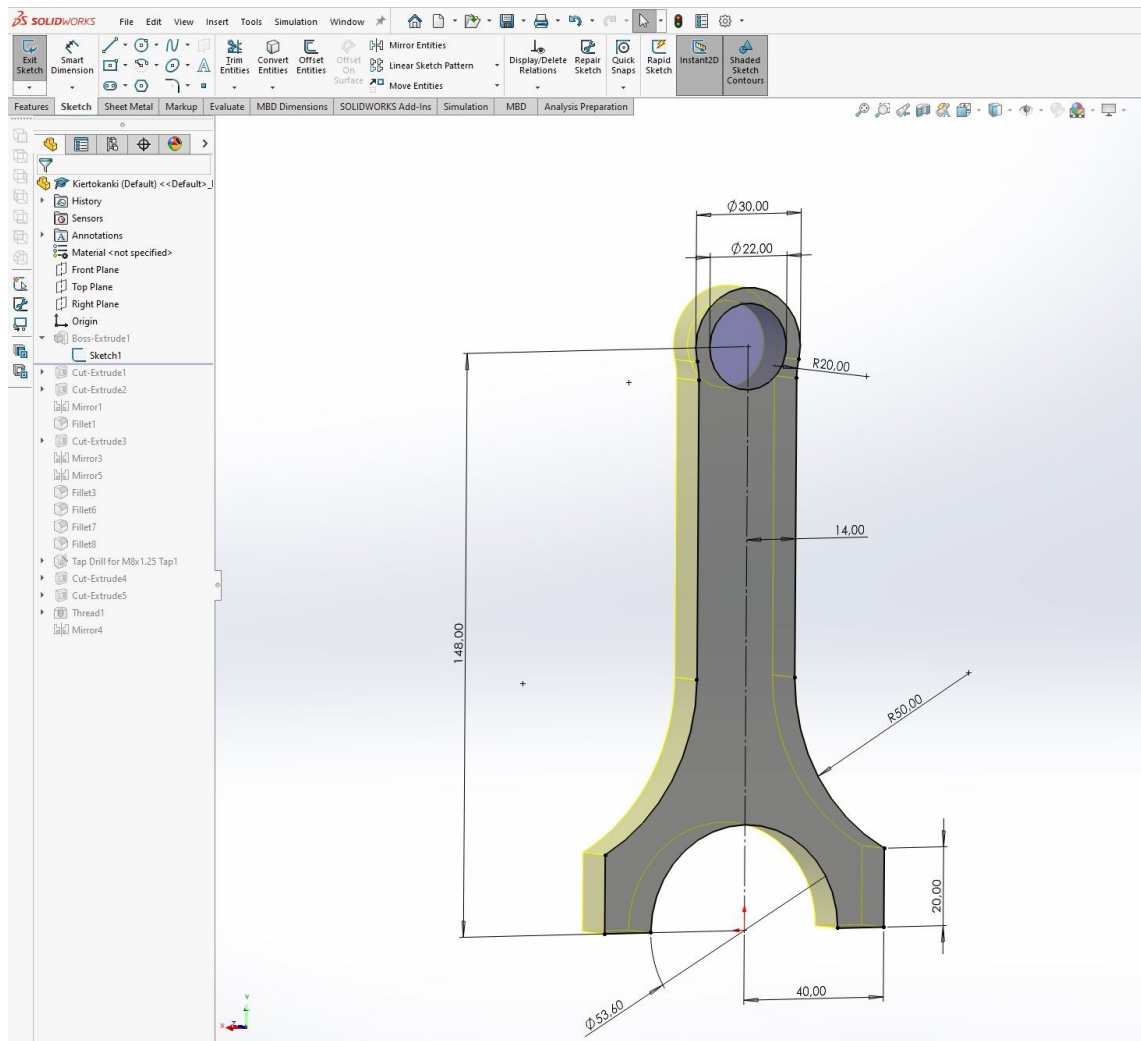
Kuva 25. Upotusten leikkaus

Männän mallinnuksessa ei ilmennyt mitään ongelmia. Mallinnus oli suoraviivaista ja nopeaa.

3.4.2 Kiertokanki

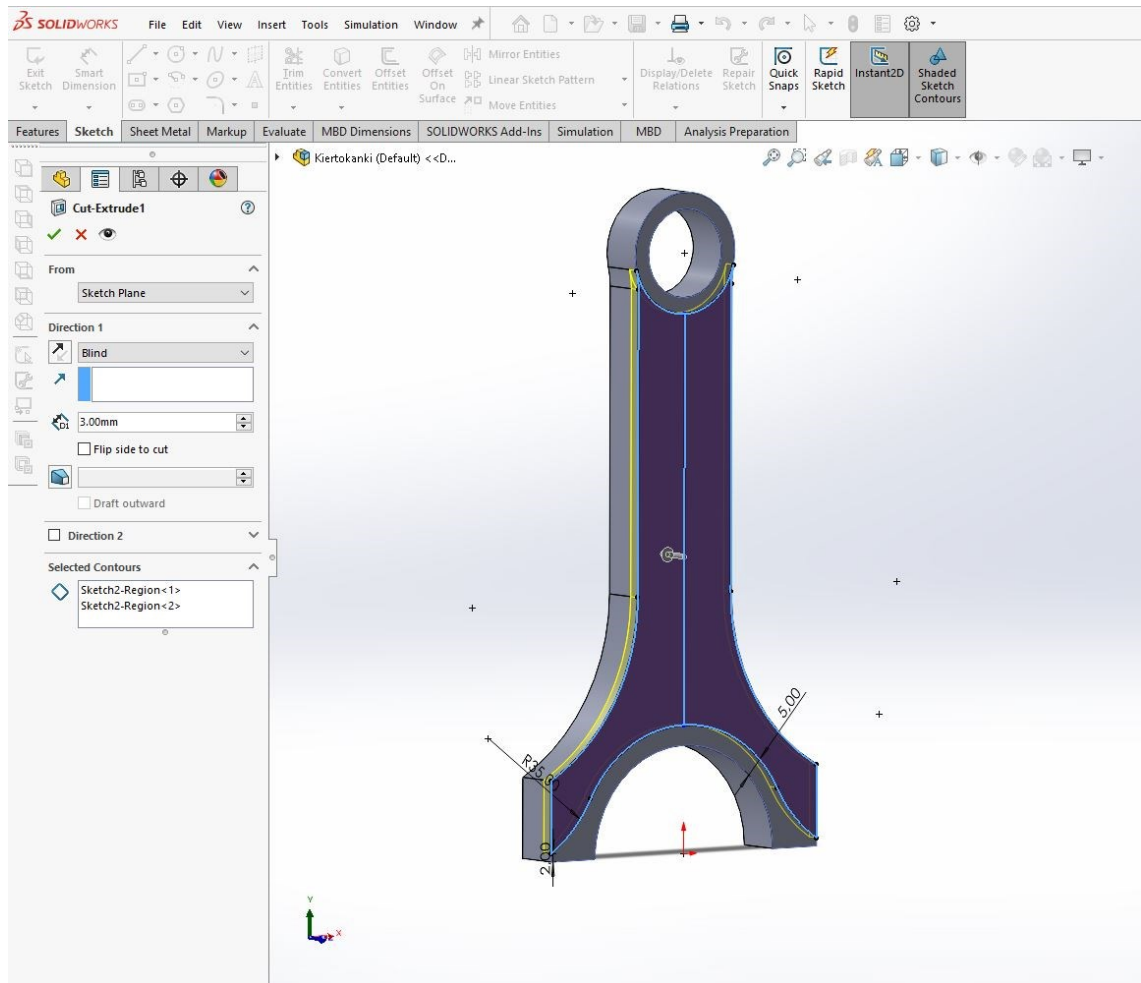
Kiertokangen symmetrian vuoksi voitiin geometria sketsata perustasolle ja purttaa yhteen suuntaan puolet halutusta paksuudesta. Piirteiden luomisen jälkeen voitiin kaikki piirteet peilata, jolloin niitä ei tarvinnut mallintaa kahteen kertaan. Sketsiin luotiin keskiviiva, jolla määriteltiin kampiakselin ja männäntäpin välinen etäisyys. Keskiviivaa voitiin käyttää myös geometrian peilaamiseen, jolloin sketsistä piirrettiin puolet ja toinen puoli saatiin Mirror Entities -toiminnolla.

SolidWorksin peilaus onnistuu valitsemalla sketsin alkioit ja taso, viiva tai pinta, jonka ympäri peilataan. Kuvassa 26 nähdään valmis mitoitettu ja peilattu sketsi.



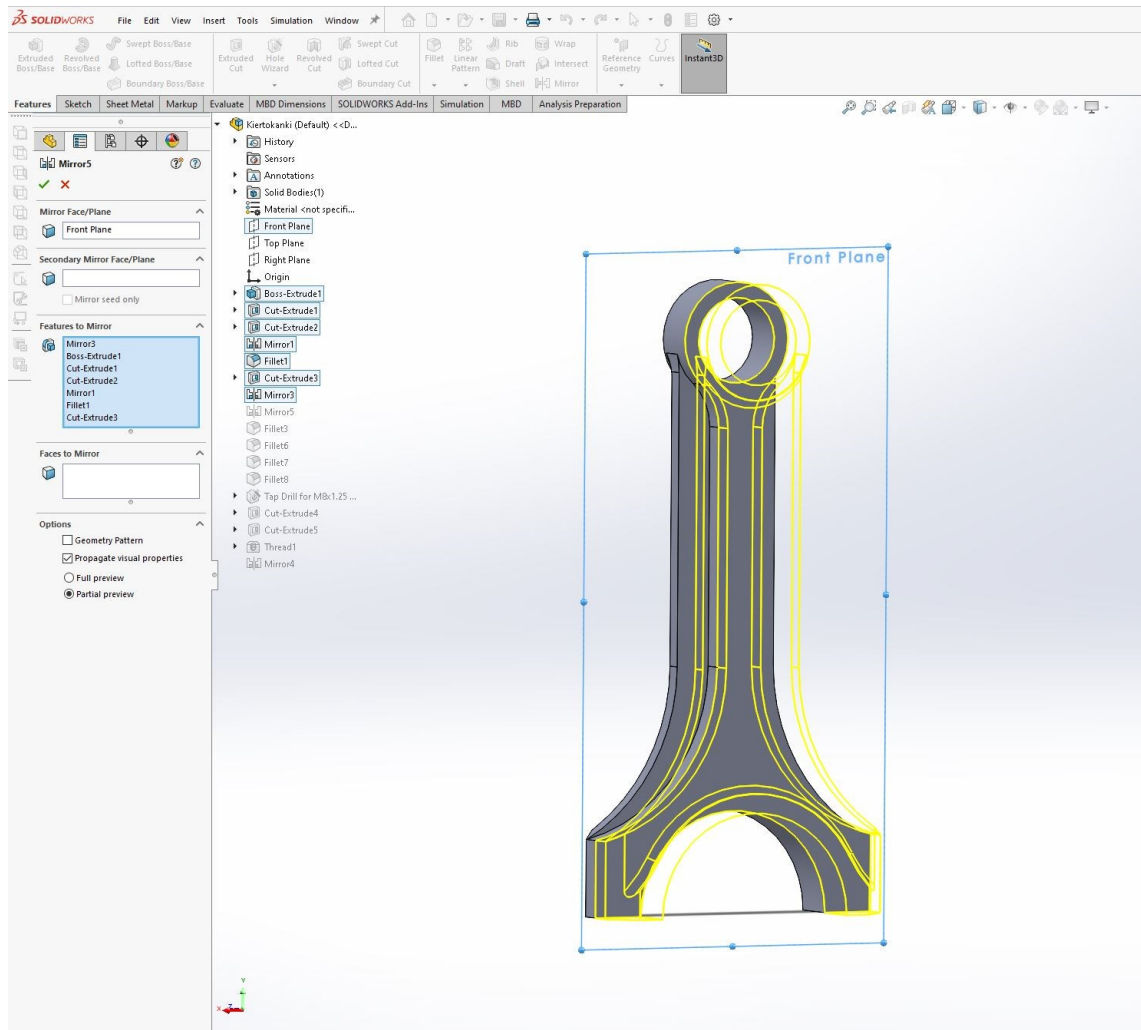
Kuva 26. Kiertokangen geometrian sketsaus

Kiertokangen ohennus tehtiin projisoinnilla osa geometriasta Convert Entities -toiminnolla ja sketsaamalla kampiakselin päähän vahvennus (kuva 27). Sketsin projisoinnilla säästetään aikaa, kun sketsiä ei tarvitse piirtää ja määritellä uudelleen. Toinen vaihtoehto on käyttää aiemmin piirrettyä sketsiä uudelleen uuden piirteen luomiseen. SolidWorksissa ei tarvitse erikseen jakaa aiempaa sketsiä, vaan riittää että sketsin asettaa näkyväksi.



Kuva 27. Sketsin projisointi kappaleen muodosta helpottaa ja nopeuttaa sketsaamista

Samalla tavalla luotiin kiertokangen sisään jäävä kevennys. Geometria projisoi-
ttiin kappaleen reunoista ja geometriaa muokattiin sopivaksi. Nyt kappale oli mi-
toiltaan ja muodoltaan halutun mallinen, voitiin se peilata Front Plane:n suhteen,
jolloin saatiin symmetrinen kappale (kuva 28).



Kuva 28. Kappaleen peilausta varten valittuna Front Plane, jonka suhteen peilaus suoritetaan, sekä halutut piirteet. Tässä tapauksessa valittiin kaikki tähän mennessä luodut piirteet

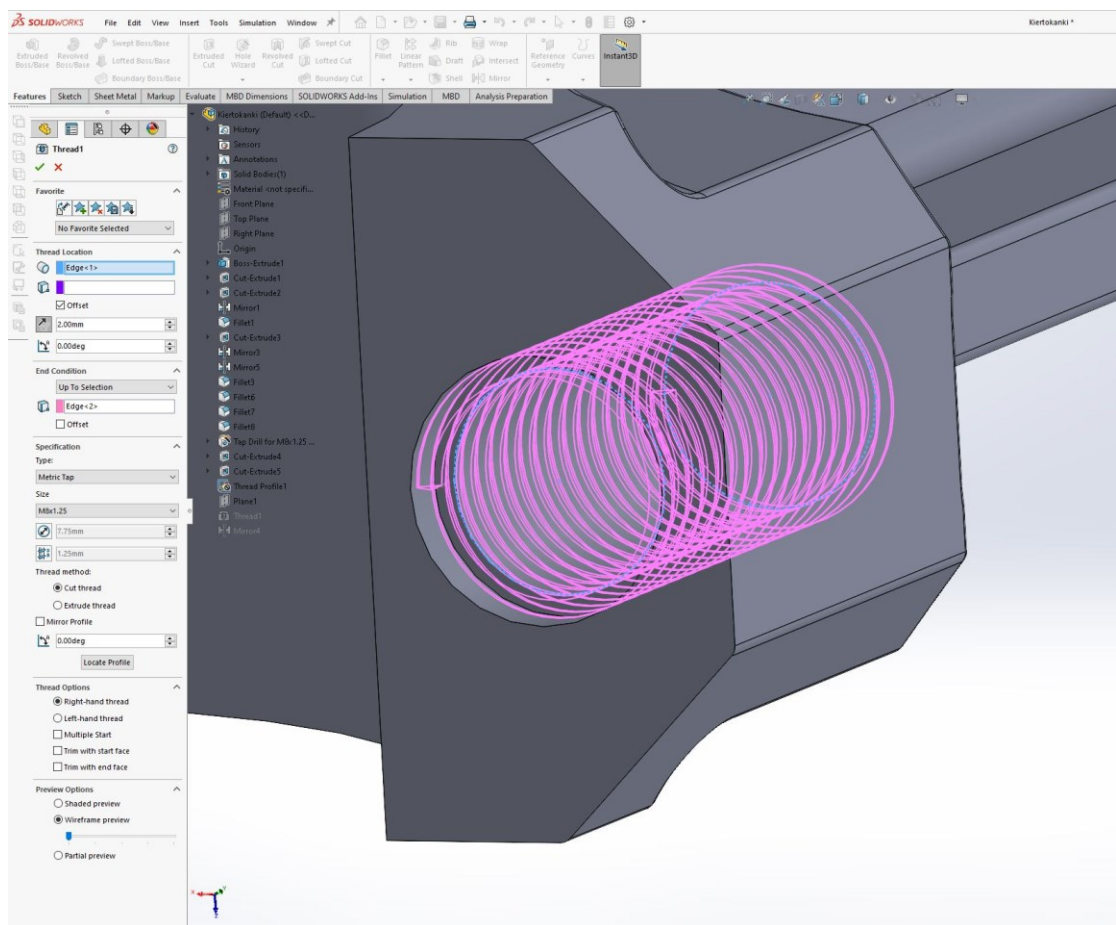
Kiertokangen kiinnitystä varten luotiin reikien piirteet, joiden koko oli kierteen sisähalkaisija. SolidWorksissa voidaan luoda kierteen piirre kierrettyökälulla, jolloin kierre näyttää siltä kuin se on oikeastikin. Tämä rasittaa työasemaa graafisesti, joka saattaa muodostua ongelmaksi suurien kokoonpanojen kanssa, joissa on suuri määrä kierteitä ja kiinnitystarvikkeita. Kierre muodostuu halkaisijan ja valitun kierreprofiilin mukaan, jolloin väärällä reikä- tai tappikoolla voisi saada aikaan ei toivotun lopputuloksen.

Kierteitä voidaan myös luoda manuaalisesti sketsaamalla kierteen profiili ja luomalla kierrekäyttämällä Helix and Spiral -piirtotyökalua. Piirre luodaan Swept

Boss/Base -piirretyökälulla, osoittamalla haluttu profiili ja polku, jota pitkin kierre leikataan tai pursotetaan. Kolmas vaihtoehto on käyttää Cosmetic Thread -toimintoa, joka luo kierteen paikalle reikien tai tapin pintaan kuvion, joka ei muuta kuitenkaan piirteen muotoa. Tällä tavoin saadaan yksinkertaistettu malli kierreestä, joka ei rasita työasemaa.

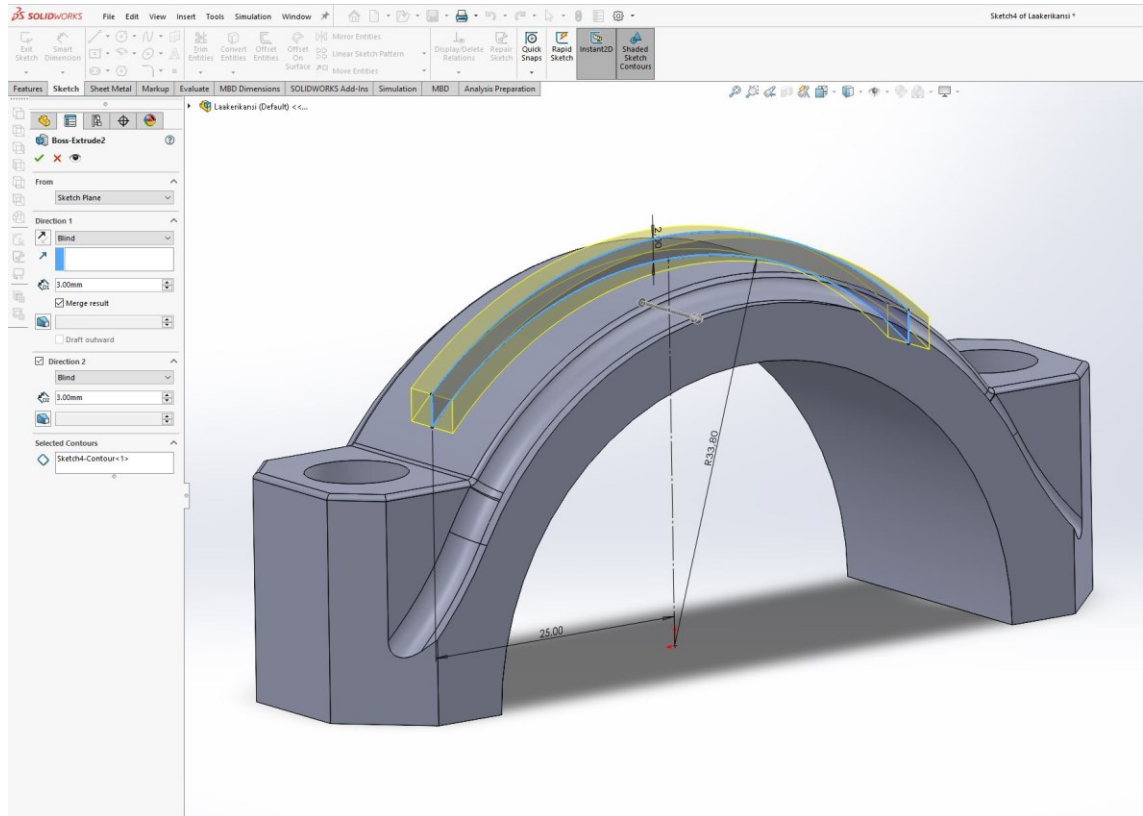
Tässä konetyypissä käytetyn kiertokangen kierteet olivat erikoiskokoa M9x1,25, jota ei SolidWorksin kierrevalikoimasta löytynyt. Mukautettuja kierteitä varten voidaan muokata kierretyökäluä ja luoda oma kustomoitu kierreprofiili. Tätä varten tarvittaisiin kuitenkin kierteen tarkat mitat. Kiertokankien kierteiden valmistamiseen kuitenkin riittää kierteen tyyppi ja tarkka sijainti.

Kuvassa 29 kierretyökäluun määrittely. Työkäluun täytyy lisätä vähintään kierteen nousun verran siirtymää, jotta kierre ei alkaisi kappaleen sisältä.



Kuva 29. Kierretyökäluun lukuisia vaihtoehtoja

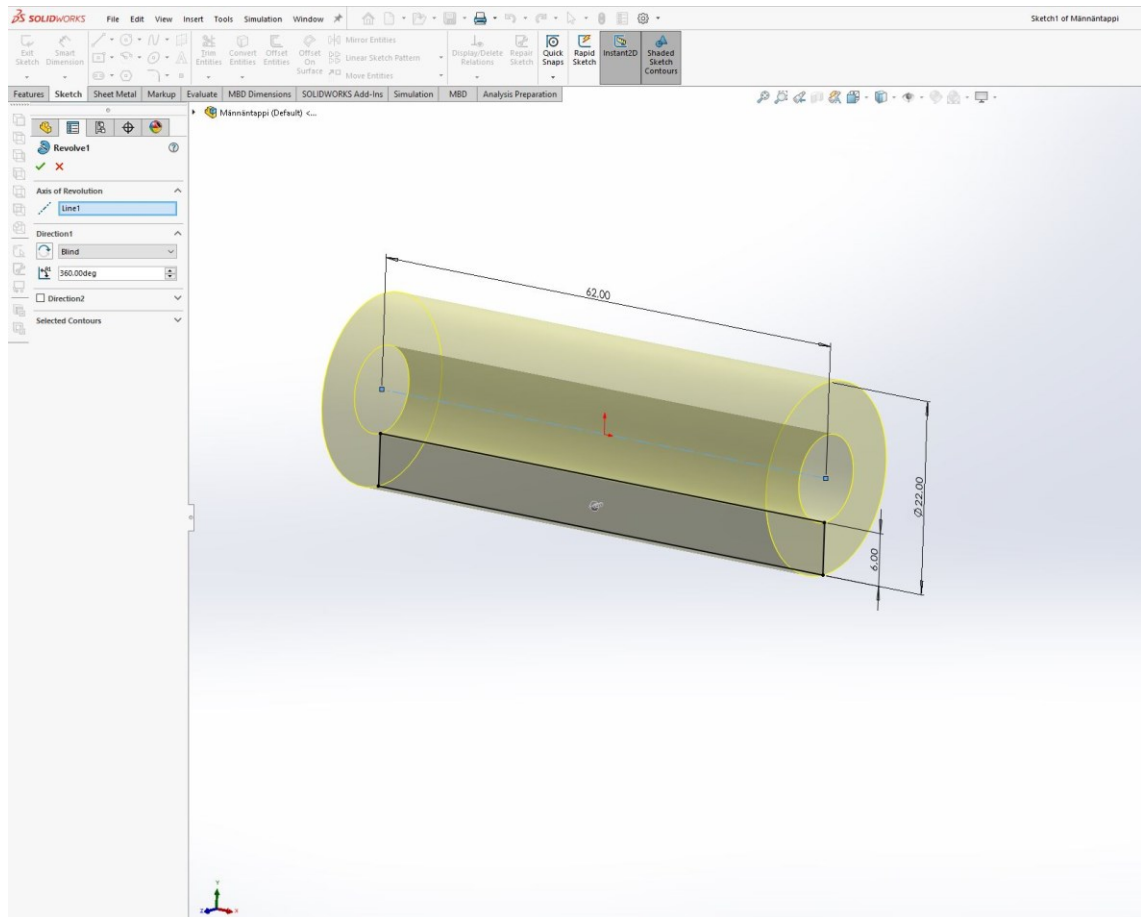
Kiertokangen laakerikannen mallinnus vastasi kiertokangen mallinnusta suurimmalta osalta. Ensin luotiin peruspiirteelle sketsi ja pursottamalla puolet halutusta paksuudesta. Sen jälkeen sketsattiin ja leikattiin muodot ja peilattiin kappale lopulliseen muotoon. Tämän vaiheen jälkeen lisättiin reikäpiirteet ja seinämän vahvike (kuva 30).



Kuva 30. Laakerikannen ulkopuolelle pursotettiin vahvike

3.4.3 Männäntappi ja sokka

Männäntappi mallinnettiin kahdella piirteellä. Pyöräytyksen jälkeen malliin lisättiin viisteet molempiin päihin. Kuvassa 31 geometrian pyöräytys Revolve-toiminnolla. Yksinkertainen sylinteri voitaisiin myös mallintaa pursottamalla, jolloin ensin sketsattaisiin kaksi samankeskistä ympyrää. Sketsi on mitoitettu niin että origo on mallin keskipisteessä. Näin helpotetaan osan asemointia.



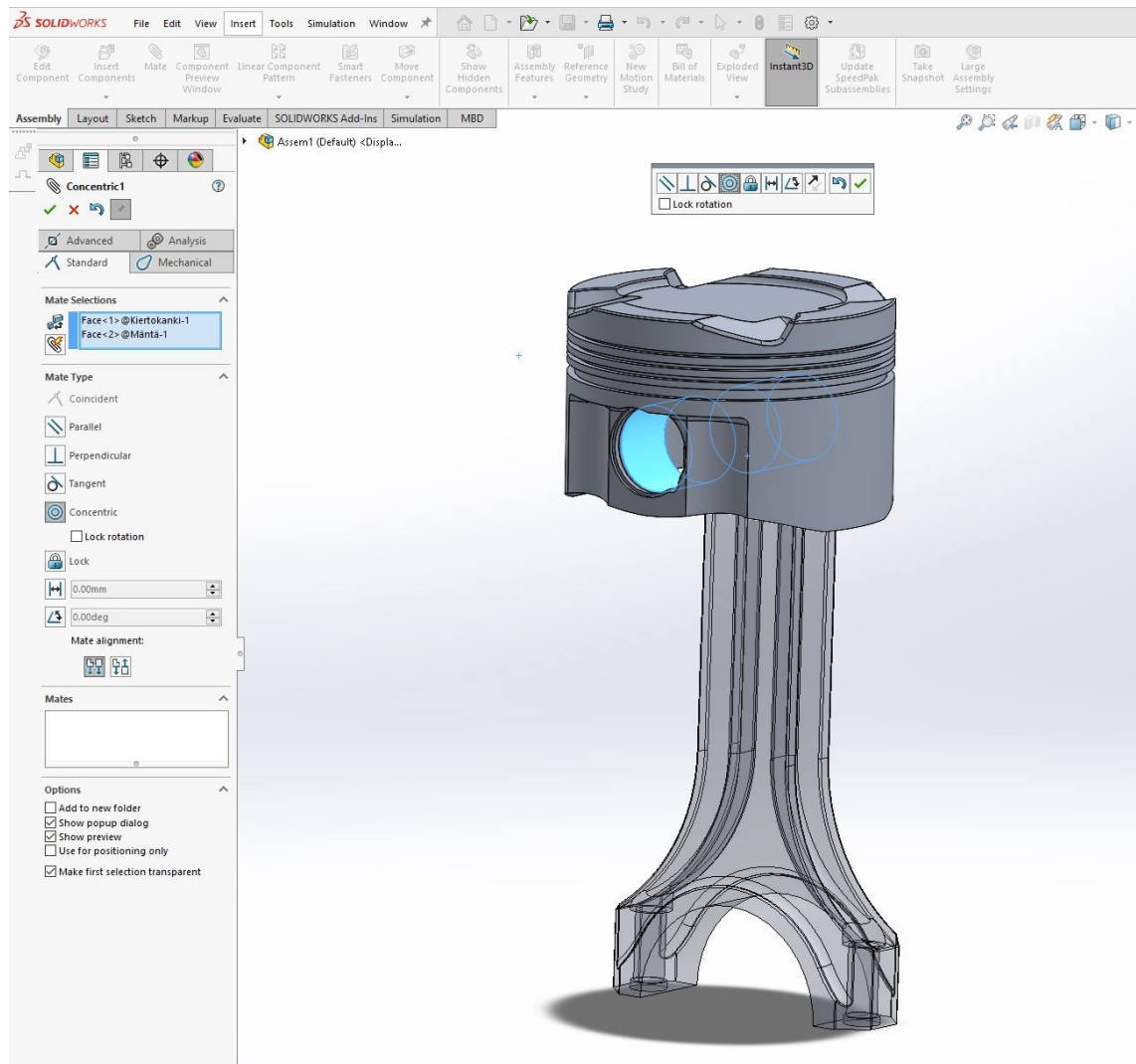
Kuva 31. Revolve-toiminto sopii erityisesti sylinterimäisten kappaleiden mallintamiseen, joissa on paljon eri halkaisijoita. Myös tällaiset yksinkertaiset sylinterit muodostuvat nopeasti

Sokka mallinnettiin samaan tapaan pyöräyttämällä.

3.4.4 Kokoonpano

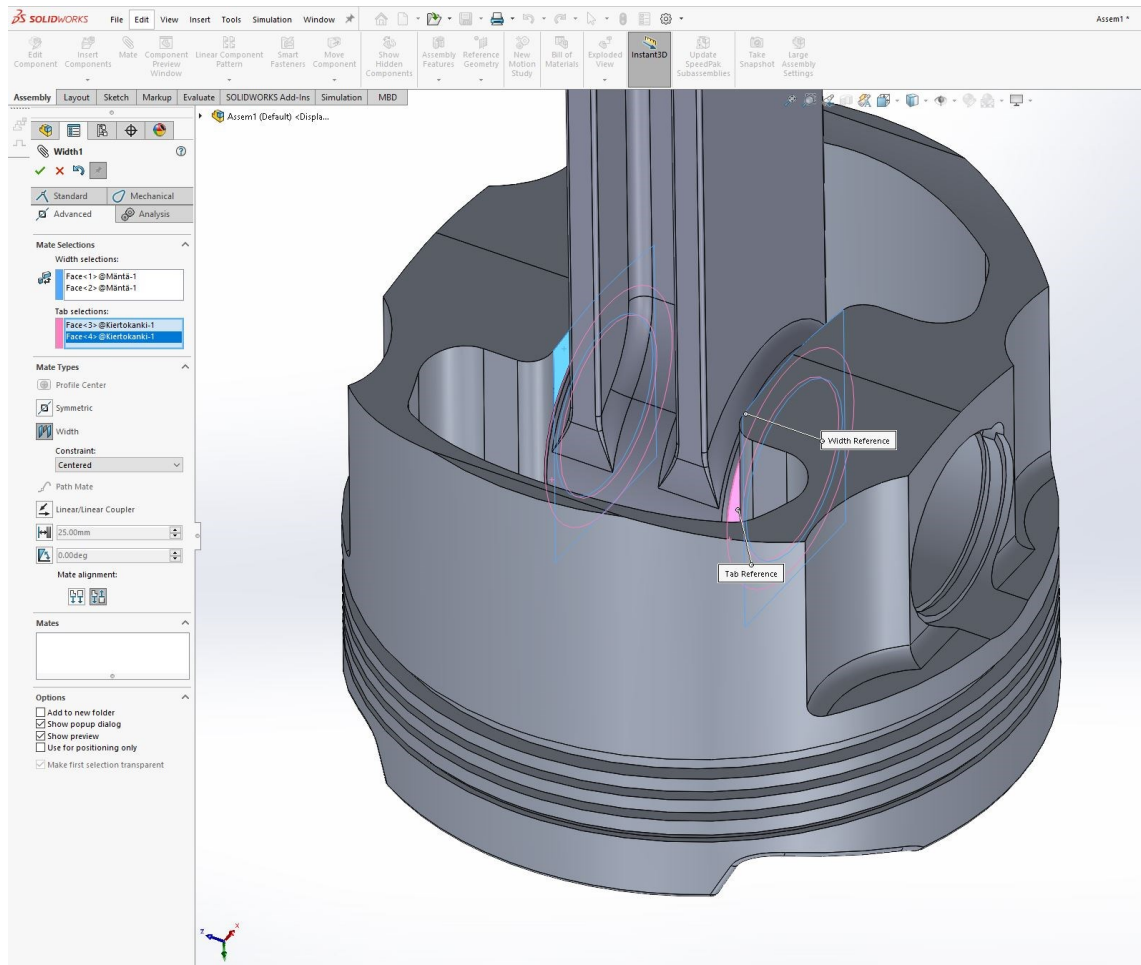
Kokoonpano aloitettiin sijoittamalla kiertokanki paikoilleen. SolidWorksissa kappaleen tuominen tapahtuu Insert Component -toiminnolla. Listalla näkyy kaikki SolidWorksissa auki olevat osat ja kokoonpanot. Jos haluttu osa ei ole auki, voi Browse-toiminnolla hakea osan kirjastosta. Osan tuominen kokoonpanoon tapahtuu raahaamalla se grafiikka-alueelle. Tällöin kappaletta ei sidota vielä millään tavalla. Toinen vaihtoehto kappaleen tuomiseen on valita se listalta ja klikata ok. Tällöin kappale lukittuu automaattisesti kokoonpanon origoon ja kappale on Fixed-tilassa, jolloin sitä ei voi liikutella. Seuraavaksi kokoonpanoon

tuotiin loput osat ja ne sidottiin käyttämällä sopivia Mate-valintoja. Kuvassa 31 kokoonpanoon tuotu mäntä ja sen sitominen Concentric-matella.



Kuva 32. Mäntä sidotaan kiertokankeen Concentric-matella

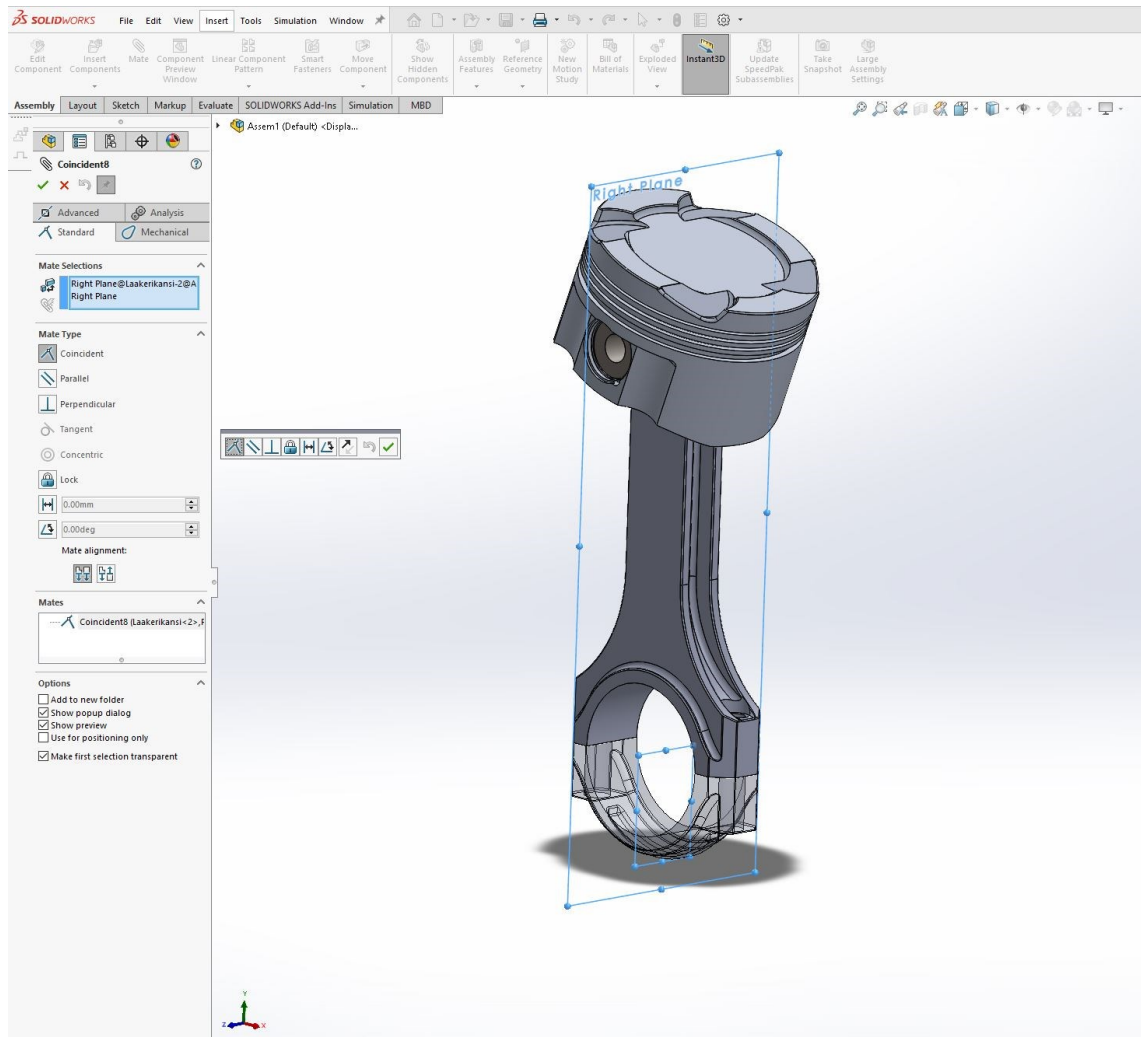
Mäntä voidaan keskittää kiertokankeen useammalla tavalla. Koska kiertokanki on mallinnettu niin, että Front Plane on geometrian keskellä, voidaan käyttää symmetriaehto. Mikäli osa on mallinnettu niin, että yksikään taso ei ole kappaleen keskellä, voidaan käyttää Width-matea symmetrisen kappaleen keskittämiseen. (kuva 33).



Kuva 33. Osan keskittäminen kokoonpanossa voidaan tehdä useammalla tavalla

Männäntappi tuotiin kokoonpanoon ja asemoitiin suunnilleen kohtisuoraan männässä olevan reiän kanssa, jonka jälkeen se sidottiin yhdenkeskeisysehdolla kiertokankeen ja Coincident-ehdolla Right Plane -kokoonpanon Front Planeen. SolidWorksissa osaa voi pyöritellä hiirellä painamalla samalla oikeaa painiketta.

Seuraavaksi kokoonpanoon tuotiin laakerikansi, ja se sidottiin kiertokankeen yhdistämällä laakerikannen tasot kokoonpanon tasoihin. Tämä oli mahdollista, kappaleiden suunnittelun vuoksi. Kiertokangen sekä laakerikannen origo sijaitsi kampiakselin laakerin keskellä (kuva 34). Tämän jälkeen kokoonpanoon sijoitettiin männätappin sokka, joka sidottiin akselistaan männätappin pyörähdysakseliin, sekä tangentialiehdolla sokan uran sivuun. Sokka peilattiin Front Planen suhteen toiselle puolelle, jolloin sille ei tarvinnut erikseen asettaa ehtoja.



Kuva 34. Tasoja sitomalla voidaan osat paikoittaa helposti

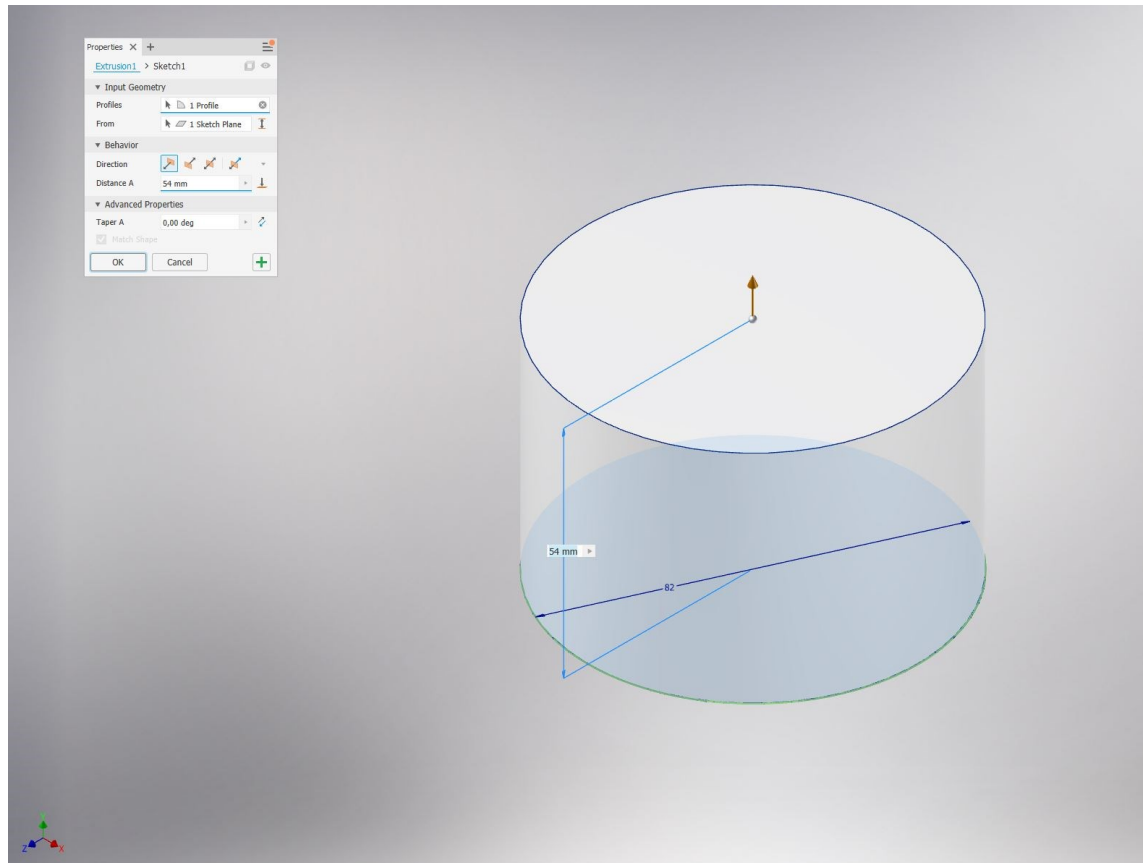
Valmis kokoonpano saatiin aikaan asettamalla yhdeksän ehtoa. Kokoonpano ei ole täysin määritelty, vaan siihen jätettiin vapausasteiksi männän, männäntapin, sekä sokkien rotaatioliike.

3.5 Mallinnuksen kulku Inventorilla

Tässä luvussa käsitellään mallinnuksen vaiheita Inventorilla. Lisäksi käydään läpi havaittuja poikkeavuuksia ja yhtäläisyyksiä.

3.5.1 Mäntä

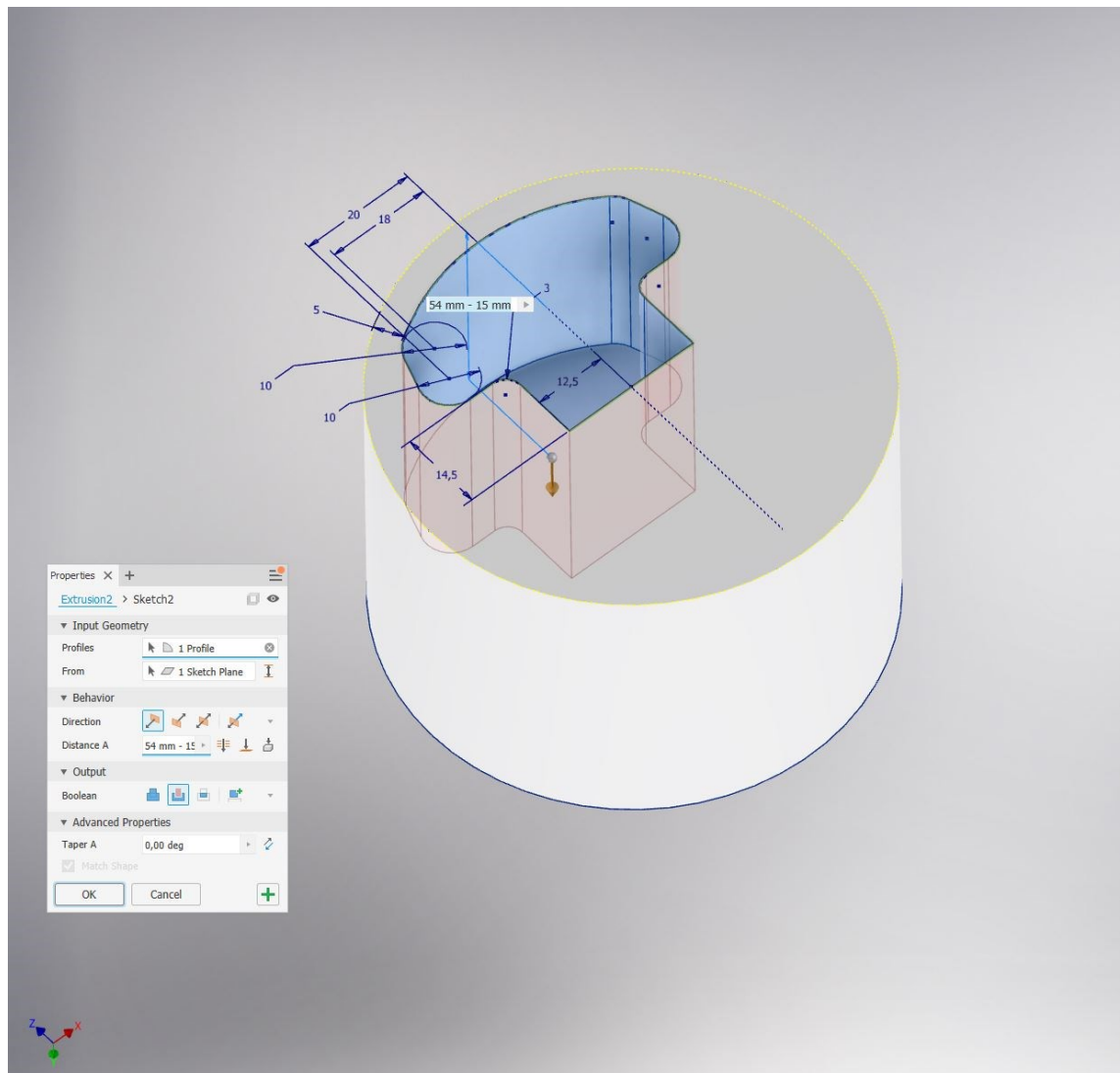
Männän mallinnus aloitettiin määrittelemällä ensin sketsi ja sen jälkeen Extrude-toiminnolla pursotettiin ensimmäinen muoto (kuva 35).



Kuva 35. Mallinnuksen aloitus Inventorilla

Männän sisäpuoli pursotettiin ontoksi samaan tapaan kuin Solidworksilla. Muoto sketsattiin kappaleen pintaan ja pursotettiin 15 mm etäisyydelle männän toisesta päästä (kuva 36). Inventor-ohjelma käyttää samaa työkalua materiaalin lisäämiseen ja leikkaamiseen. Extrude-toiminnosta valitaan liitetäänkö pursotettu muoto olemassa olevaan tilavuusmalliin vai leikataanko siihen pursotuksen kokoinen aukko. Intersect-toiminnolla saadaan aiemman tilavuusmallin ja pursotetun jakama tilavuus ja loput leikkaantuu pois. Lisäksi New Solid -toiminto luo pursotuksen tuloksesta uuden tilavuusmallin rakennepuuhun. Solidworksissa

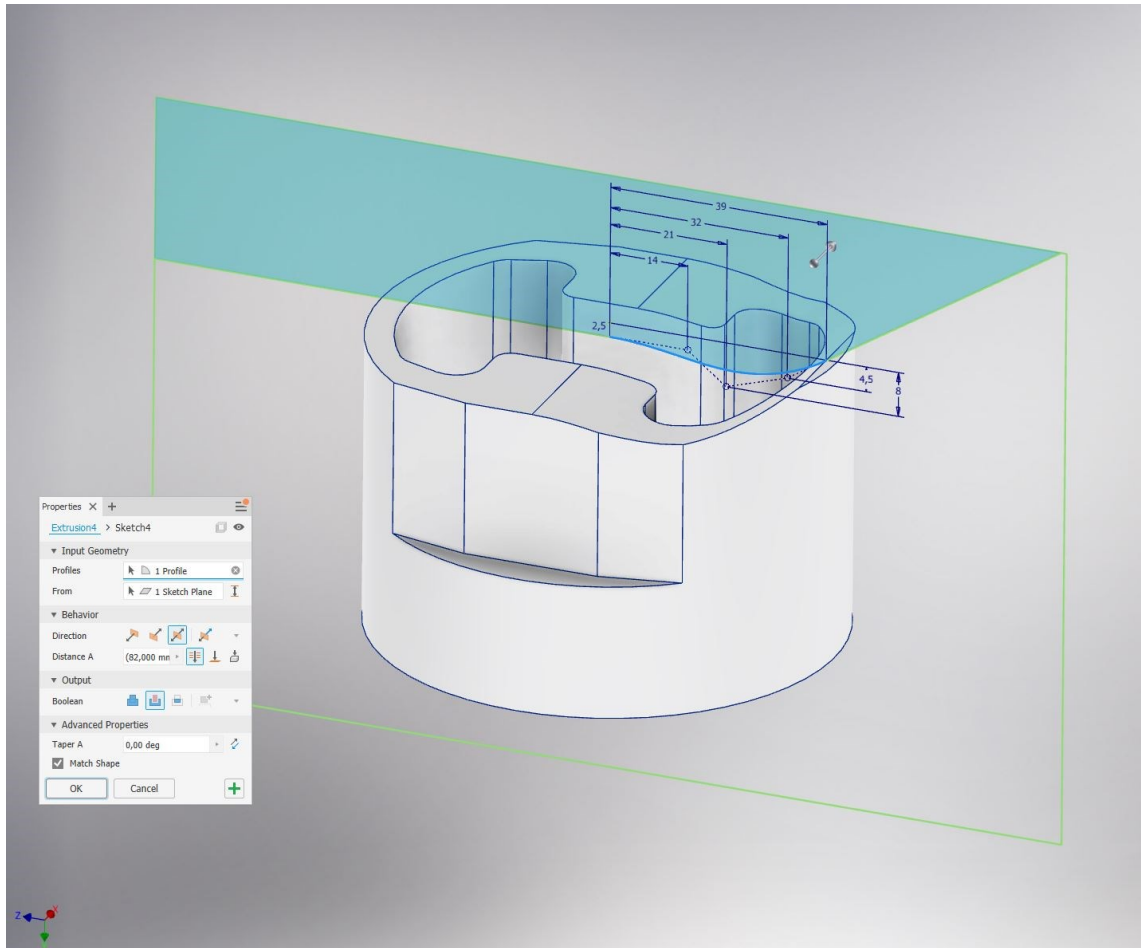
tämä toiminto voidaan suorittaa poistaa valinta Merge result, joka on oletusasetuksena lisäävässä pursotuksessa.



Kuva 36. Männän sisäpuolen pursotus

Männän alapinnan muodon sketsaus tehtiin kappaleen sisällä olevalle tasolle. SolidWorks leikkaa näkymän automaattisesti niin, että sketsi on näkyvässä. Näin ei tapahdu Inventorissa, vaan malli jää ikävästi peittämään sketsausta ja piirto-työkalu tarttuu kappaleen geometriaan haitaten piirtoa. Tämän ongelman voi kiertää tekemällä kappaleesta osaleikkaus piirtotasolla, jolloin piirtäessä näkymää ei peitä mallinnetun kappaleen geometria.

Muodon leikkaukseen riittää pelkkä viiva, joka leikkaa olemassa olevan tilavuusmallin. Inventor luo leikkaukseen tarvittavat pinnat itse (kuva 37). SolidWorksissa tämä ei onnistu, vaan sketsin täytyy olla suljettu. Ohjelma kysyy haluaako käyttäjä, että ohjelma yrittää sulkea sketsin. Tämä saattaa myös tuottaa ei-toivotun lopputuloksen. Varminta on määritellä itse suljettu sketsi.

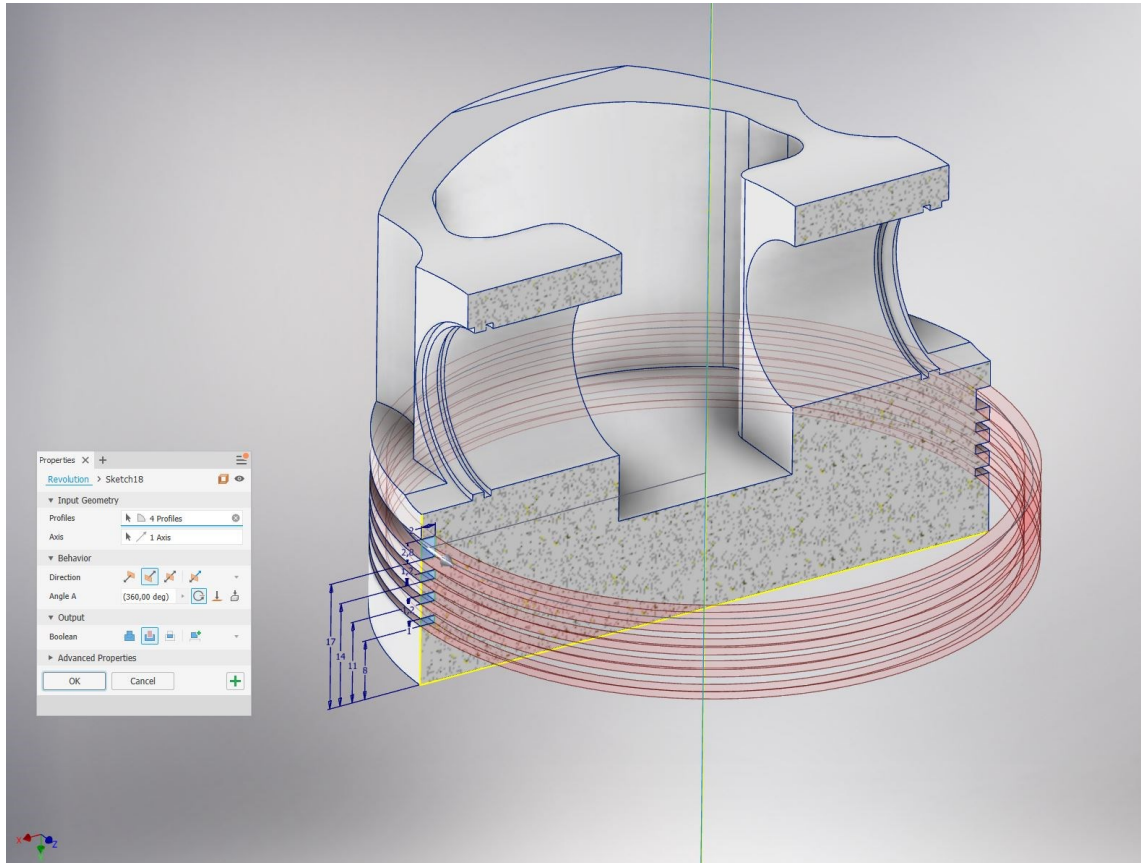


Kuva 37. Leikkauksen profiili muodostuu yhdellä viivalla

Seuraavaksi tehtiin muotojen leikkauksia ja männäntapin reikä. Nämä toteutettiin samoin kuin edellä ja työvaiheet eivät poikenneet SolidWorksin työvaiheista.

Männäntapin kiinnitystä varten tehtiin sokalle ura. Tässä työvaiheessa ei voitu käyttää samaa menetelmää kuin SolidWorksilla mallintaessa. Inventorilla voi aloittaa pursotuksen eri tasopinnalta kuin missä sketsi sijaitsee, mutta sitä ei voi aloittaa tietyltä etäisyydeltä sketsistä. Tätä varten täytyy luoda aputaso. Uria voi

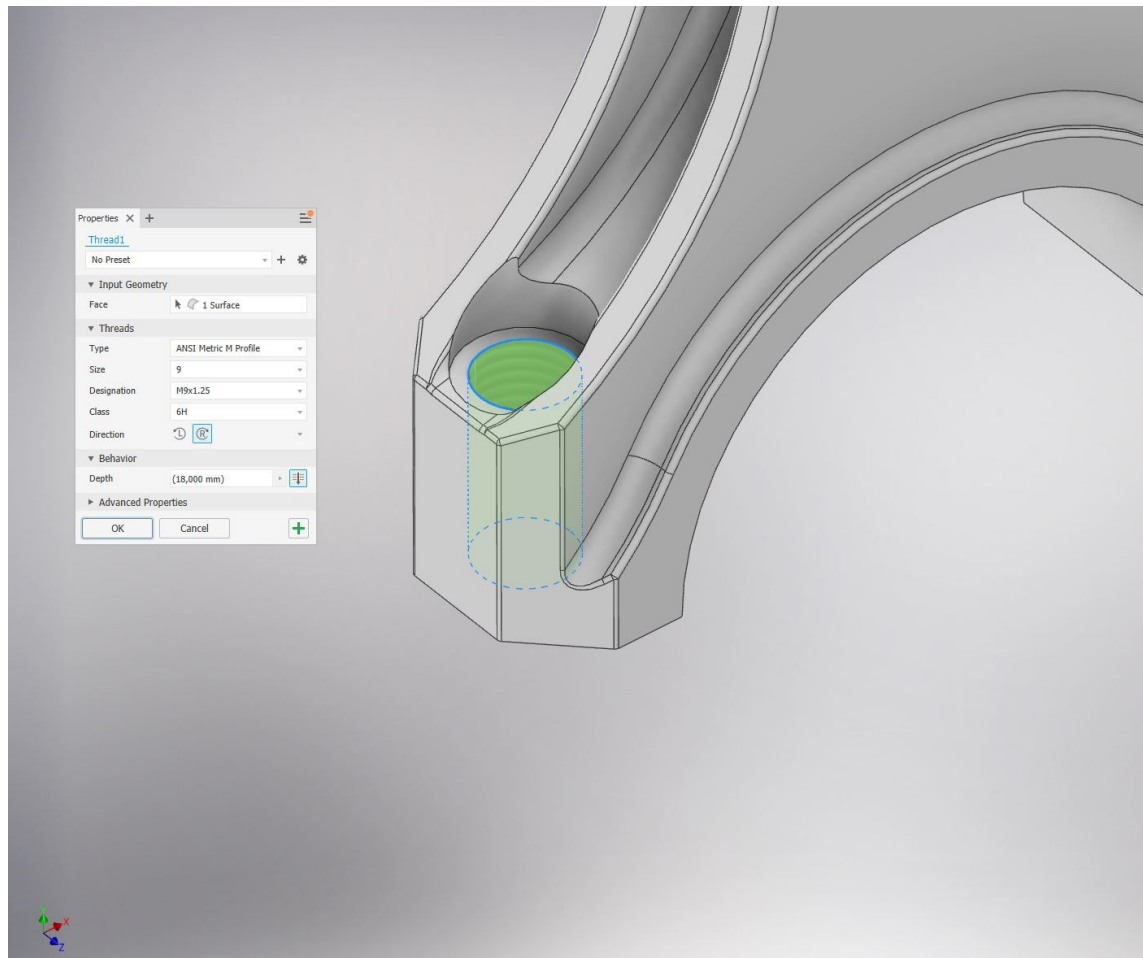
myös mallintaa toisella tavalla. Ensin sketsataan uran poikkileikkaus ja Revolve-toiminolla pyöräytetään leikkaus akselin ympäri. Kuvassa 38 sketsattuna männänrenkaiden urien poikkileikkaus ja leikkaus Revolve-toiminnolla.



Kuva 38. Männänreikaiden profiilin leikkaus yhdellä sketsillä

3.5.2 Kiertokanki

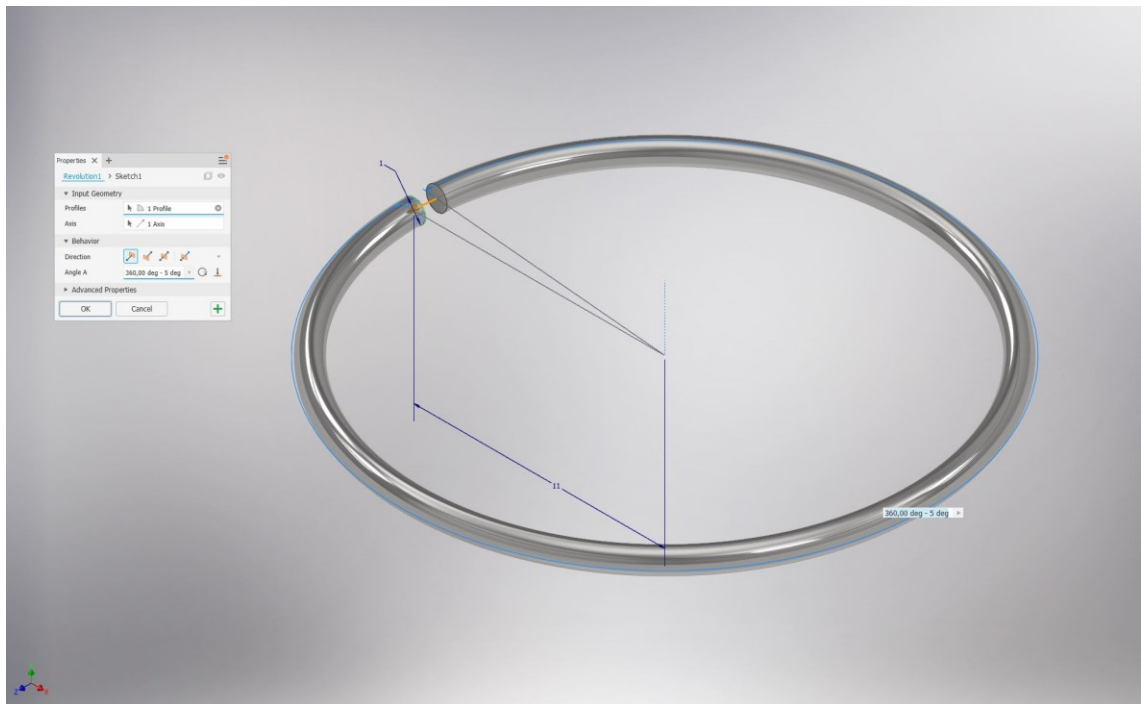
Kiertokangen mallinnus sujui täsmälleen samalla tavalla kuin SolidWorksilla mallintaessa. Inventorin kierretyökalu tuottaa ainoastaan graafisen mallin kierreestä kappaleen pintaan (kuva 39). Tämä on kevyempi ratkaisu kuin SolidWorksissa, jossa kierre leikataan kappaleeseen. Kierrepierre sisältää kaiken tarvittavan tiedon kierteen valmistamista varten, mutta jos kierre täytyy valmistaa 3D-tulostamalla, täytyy kierre mallintaa luomalla 3D-sketsi ja käyttämällä Helical Curve -piirtotyökalua ja sen jälkeen Sweep-toimintoa.



Kuva 39. Inventor muodostaa kierrepiirteestä ainoastaan kierteen näköisen kuvan reiän tai tapin pinnalle

3.5.3 Männäntappi ja sokka

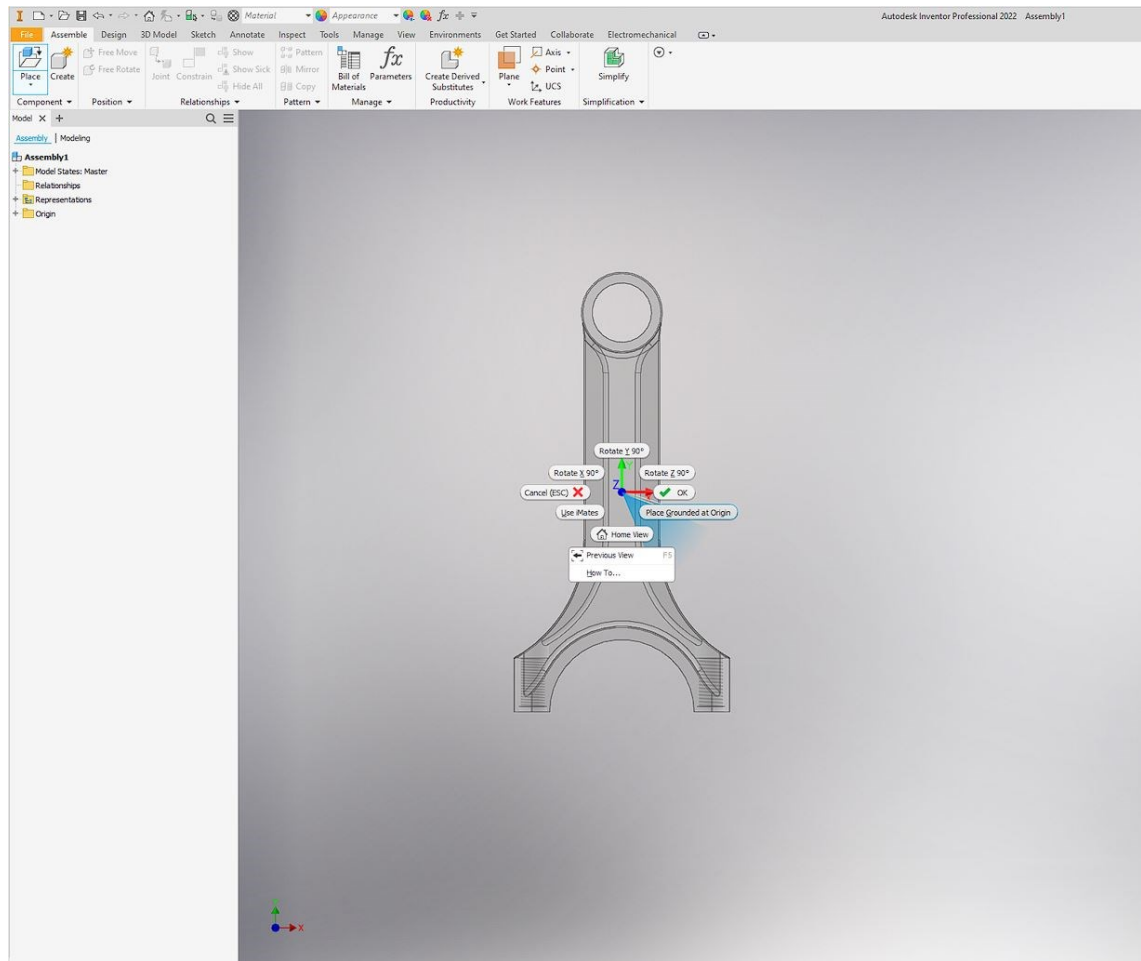
Männätappi mallinnettiin täsmälleen samalla tavalla kuin SolidWorksissa. Sokka mallinnettiin Revolve-toiminnolla (kuva 40).



Kuva 40. Sokka mallinnetin käyttäen Revolve-toimintoa

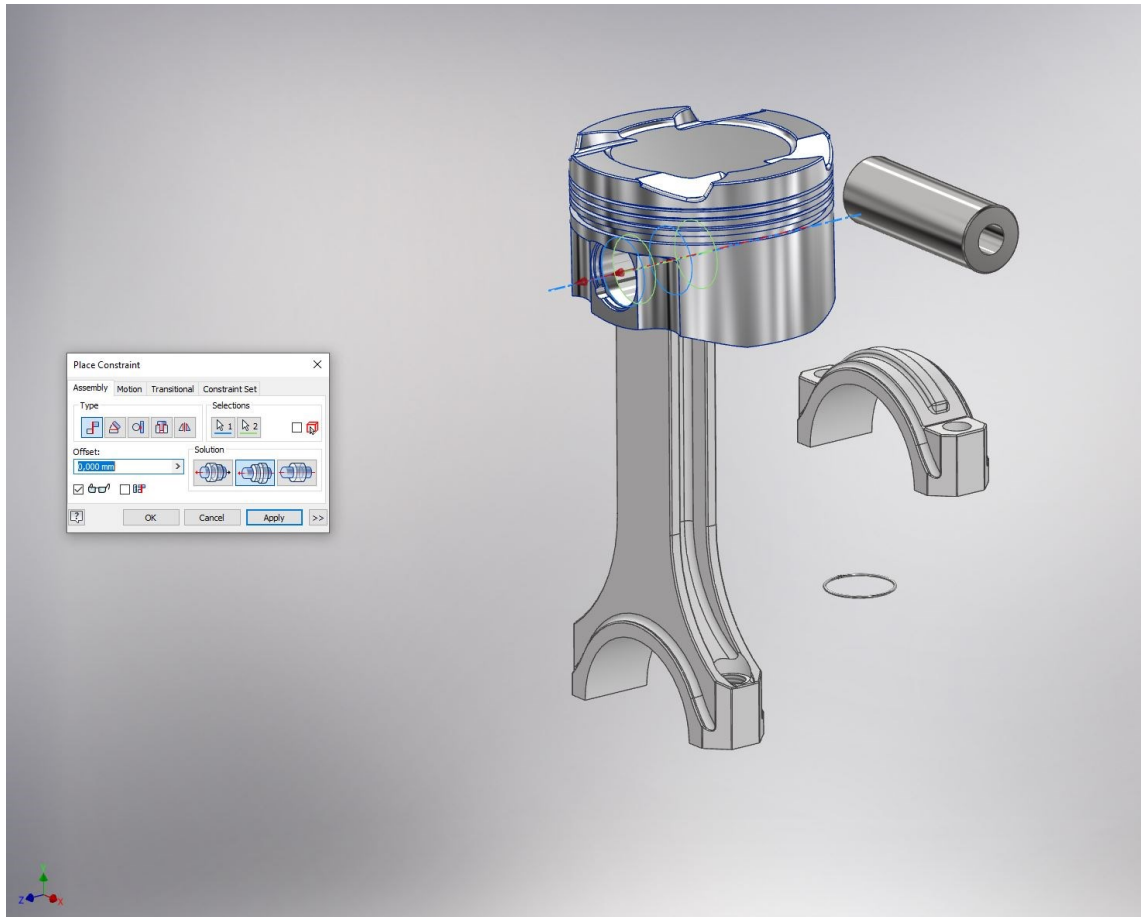
3.5.4 Kokoonpano

Inventorissa kokoonpano aloitetaan luomalla uusi tiedosto ja valitsemalla Assembly-mallipohja. Osat tuodaan Place-toiminnolla. Ensimmäinen osa kannattaa asettaa Place Grounded at Origin -toiminnolla, joka lukitsee osan koordinaatiston kokoonpanon koordinaatistoon (kuva 41).



Kuva 41. Osan tuominen kokoonpanoon

Loput osat voidaan asetella silmämääräisesti lähelle oikeita paikkojaan. Osat sidotaan kokoonpanoon Constrain-toiminnolla. Osoittamalla reikää tai akselia, Inventor piirtää osoitetun geometrian pyörähdysakselin, jota ollaan sitomassa. Tämä antaa selkeän ja yksiselitteisen kuvan mitä ollaan tekemässä. Valikon Solution-ikkunaan ilmestyy valinnat osien orientaatioille (kuva 42).



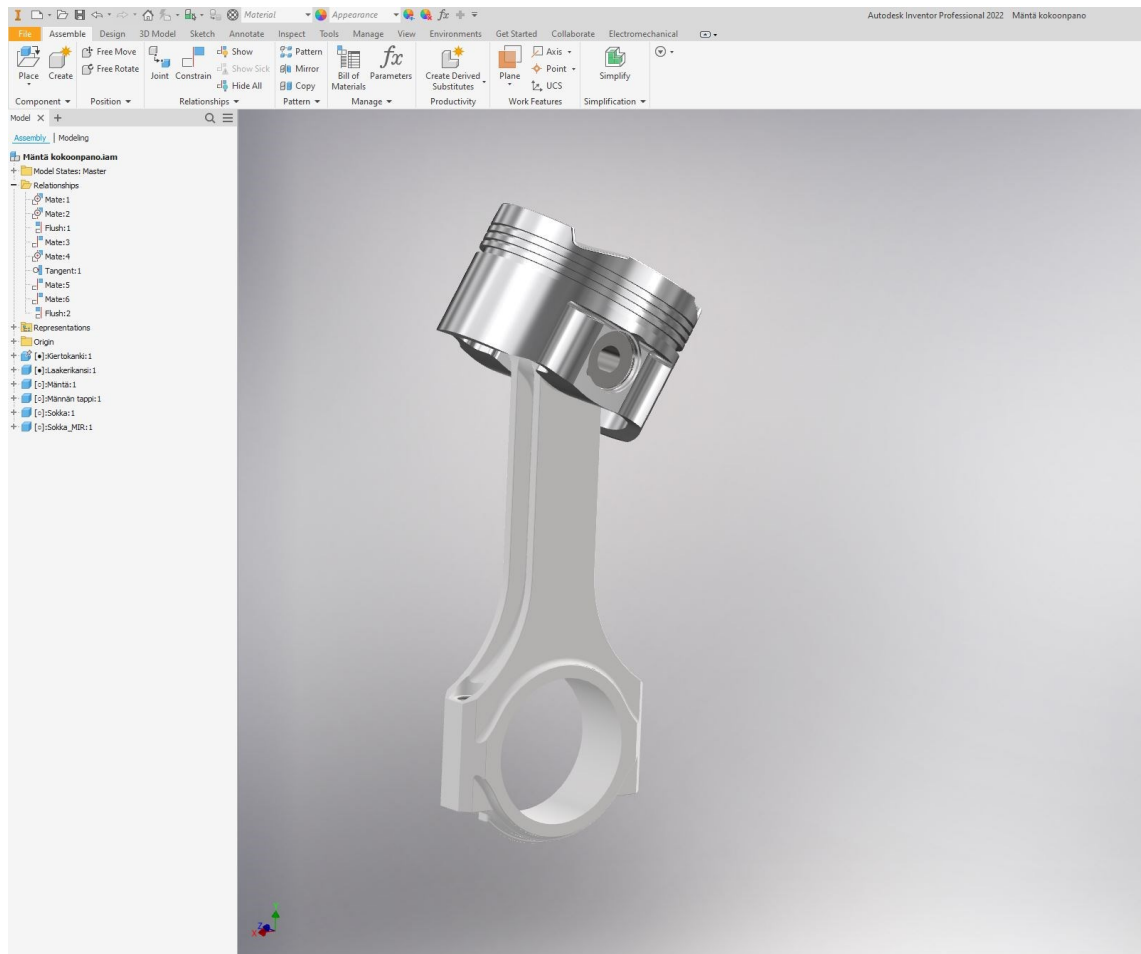
Kuva 42. Inventorin Constraint-valikko on selkeä ja yksinkertainen

Männän sivuttaissuuntainen sitominen tehtiin sitomalla männän XY-suuntainen taso kokoonpanon XY-suuntaiseen tasoon Flush-toiminnolla, joka sitoo kaksi tasoa tai pintaa toisiinsa niin, että ne ovat samansuuntaisesti. Symmetriaehto ei voitu käyttää, koska Inventor sallii ainoastaan kahden osan sitomisen symmetrisesti tasoon nähden. Yhden osan kaksi pintaa ei näin ollen ole mahdollista sitoa symmetrisesti tasoon. Tämä ei ole tässä mallissa ongelma, mutta jos mäntä olisi epäsymmetrinen, olisi sitomiseen käytettävä Offset-toimintoa, ja etäisyys olisi määriteltävä laskemalla.

Loput osat paikoitettiin ja sidottiin samalla tavalla kuin Solidworksissa. Sokka peilattiin toiselle puolelle. Inventorin Mirror Components -toiminto kopioi osan peilikuvana ja tallentaa sen omana osana. Osa näkyy myös osaluettelossa omana osana. Tämä ei ole tarkoituksenmukaista tässä yhteydessä, joten toinen

sokka on tuotava kokoonpanoon erikseen. Näin saadaan osaluetteloon kaksi samaa osaa. Inventorin peilaustoiminto on kätevä, jos halutaan luoda peilikuva osasta, jonka kätisyys halutaan vaihtaa. Osan yksinkertaiseen monistukseen Mirror-työkalusta ei ole.

Kuvassa 43 valmis kokoonpano.



Kuva 43. Valmis kokoonpano saatiin aikaan käyttämällä yhdeksää ehtoa

3.6 Yhteenveto mallinnusprosessista

Sketsaus SolidWorksissa havaittiin käteväksi ja vaivattomaksi. Ehtojen asettaminen oli intuitiivista ja helposti omaksuttavaa. Ohjelma ehdottaa käyttäjän valintojen mukaan sopivia ehtoja alkiolle. Inventorin ehtojen asettelu on aluksi vaihalloista ja vaatii opettelua. Kuvakkeet ovat pienikokoiset, eivätkä ne ole kovin

kuvaavia. Sopivat ehdot löytyvät helpoiten pitämällä hiiren osoitinta painikkeen kohdalla, jolloin ehto kuvaavan tekstin alle ilmestyy myös suurempikokoinen, toiminnon havainnollistava kuva. Molemmista ohjelmista löytyy samat ehdot objektien sitomiseen. Ainoastaan kuvakkeiden ulkoasussa on eroja.

Mallinnuksen kulku oli sujuvaa ja helppoa molemmilla ohjelmilla. Eroja ohjelmien välillä ei toiminnoissa juurikaan ole. Inventorissa ei pysty määrittämään pursotuksen aloitusta etäisyytenä tasoon nähden. Pursotus tarvitsee aina referenssiksi tason, josta pursotus aloitetaan. Tämä puute tekee tiettyjen mallinnustehtävien suorittamisesta hankalampaa.

Osien tuominen kokoonpanoon on helppoa ja vaivatonta molemmilla ohjelmilla. Kokoonpanon osien sitominen ehdoilla on SolidWorksissa oman kokemuksen mukaan vaivattomampaa ja työnkulku on sujuvampaa. Inventor suoriutuu kaikista tehtävistä, mutta lopputulokseen pääseminen vaatii lisätyötä ja totutusta poikkeavaa lähestymistapaa.

4 Työn tulosten arviointi

Tässä opinnäytetyössä ei ollut yhtä tiettyä ongelmaa, joka olisi pitänyt ratkaista. Työssä vertailtiin kahta hyvin samankaltaista ohjelmaa, niiden ominaisuuksia, toimintoja ja käytettävyyttä. Toimintojen suuren määrän vuoksi oli vertailu rajattava yhden kokonaisuuden laajuiseksi. Osien mallinnuksessa toistuivat samat toiminnot useampaan otteeseen.

Ohjelmien käyttöliittymät ovat hyvin samankaltaiset. Eri osa-alueet on jaettu välilehdille ja jokaisella välilehdellä on nauhavalikko, jossa painikkeet toiminnoille. Painikkeet ovat jaoteltu selkeästi ryhmiin kummassakin ohjelmassa. SolidWorksin vahvuus on selkeys ja helppokäyttöisyys. Ohjelman käytön oppii nopeasti ja toimintojen ohjeet ilmestyvät hiiren osoittimen osuessa toiminnon päälle. Sama toiminto löytyy myös Inventorista, mutta toiminnot eivät ole aivan yhtä selkeitä.

Suurin ero ohjelmien välillä on geometrinen ehtojen asettaminen sketsissä ja kokoonpanoissa. Solidworks näyttää valittujen alkioden olemassa olevat geometriset rajoitteet ja ne, jotka ovat mahdollista asettaa kyseisiin alkioihin. Tämä selkeyttää ja helpottaa sketsin määrittelyä. Inventorista löytyvät lähes samat työkalut geometrinen ehtojen asettamiseen, mutta ne täytyy valita itse.

Kokoonpanojen määrittelyssä SolidWorksin työkaluvalikoima on huomattavasti laajempi kuin Inventorin vastaava. SolidWorksissa on viiden perustyökalun lisäksi seitsemän mekaanista kiinnitystä, sekä viisi edistyneempää työkalua. Inventorissa on ainoastaan viisi perustyökalua, sekä neljä erikoisempaa työkalua. Inventorin työkalujen puutteellisuuden vuoksi suunnittelija saattaa joutua lisäämään malleihin ylimääräisiä aputasoja tarpeen mukaan.

Vertailuun valitut ohjelmistot ovat erittäin vaativaan ammattilaiskäyttöön tarkoitettuja, kokonaisvaltaisia suunnitteluohjelmistoja. Ohjelmistojen paremmuutta ei näin ollen voi objektiivisesti määrittää. Käyttäjystävällisyys, toimintojen selkeys ja omaksuttavuus ovat ominaisuuksia, joita voitiin käyttäjän näkökulmasta arvioida.

Käyttäjystävällisyyden osalta ohjelmat ovat samalla tasolla. Ainoastaan Inventorin geometrinen ehtojen asettaminen, sekä osien kiinnittäminen kokoonpanoissa, oli hankalampaa ja epäkäytännöllistä.

Toimintojen selkeys oli molemmissa ohjelmissa erittäin korkealuokkaista. Toiminnot olivat selitetty tekstin, kuvien ja SolidWorksissa, joissain tapauksissa animaatioin. Tämä on mukava lisä, mutta ei tee merkittävää eroa ohjelmien välille.

Omaksuttavuuden osalta arviota ei voitu suorittaa, ohjelmien ollessa jo entuudestaan tuttuja.

Kokonaisuutena Solidworks on vertailussa hyvin pienellä erolla Inventorin edellä käyttäjystävällisyydessä, sekä toimintojen selkeydessä.

5 Yhteenveto

Työn tavoitteena oli vertailla kahta hyvin samankaltaista ohjelmaa, jotka on tarkoitettu suorittamaan samoja tehtäviä. Toimintojen määrä on niin suuri, että niiden vertailu definiivisesti on miltei mahdotonta. Ohjelmien vertailussa tuli selväksi, että ohjelman valinta on aina kompromissi: toinen ohjelma suoriutuu paremmin tietyistä tehtävistä ja toinen toisista, ilman merkittäviä eroja. Ohjelman käyttötarkoitus ratkaisee lopulta kumpaa ohjelmaa kannattaa harkita. Myös ohjelmien hinta ja käytettävissä oleva budjetti voivat olla ratkaisevassa asemassa ohjelman valinnassa.

Jälkikäteen asiaa pohtiessani, olisi varmaan ollut parempi rajata aihetta vielä tarkemmin, ja käsitellä ohjelmien sopivuutta vain tiettyyn, tarkoin rajattuun tarkoitukseen.

Lähteet

About Part Features, 2021. Verkkoaineisto. Autodesk Help. <<https://knowledge.autodesk.com/support/inventor/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2021/ENU/Inventor-Help/files/GUID-0029C6B9-F6CB-4692-9AEE-19B5368195FD-htm.html>> Päivitetty 14.10.2021. Luettu 28.10.2022.

Assembly Constraints, 2021. Verkkoaineisto. Autodesk Help <<https://knowledge.autodesk.com/support/inventor/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2021/ENU/Inventor-Help/files/GUID-CF4462AF-CEC6-4B8B-8F86-72D9AC9A3574-htm.html>> Päivitetty 14.10.2021. Luettu 28.10.2022.

Beck, A. The History of CAD since 1957. Verkkoaineisto. CADENAS PARTsolutions. <<https://partsolutions.com/60-years-of-cad-infographic-the-history-of-cad-since-1957/>> Luettu 28.10.2022.

Bethany, 2017a. Autodesk – Everything You Need To Know. Verkkoaineisto. Scan2CAD <<https://www.scan2cad.com/blog/cad/autodesk/>> Päivitetty 1.5.2020. Luettu 28.10.2022.

Bethany, 2017b. A Brief History of SolidWorks. Verkkoaineisto. Scan2CAD. <<https://www.scan2cad.com/blog/cad/solidworks-history/>> Päivitetty 1.5.2020. Luettu 28.10.2022.

Bethany, 2017c. How CAD Has Evolved Since 1982. Verkkoaineisto. Scan2CAD. <<https://www.scan2cad.com/blog/cad/cad-evolved-since-1982/>> Päivitetty 28.6.2019. Luettu 27.10.2022.

Construction Entities, 2021. Verkkoaineisto. Solidworks Help. <https://help.solidworks.com/2022/english/SolidWorks/acadhelp/c_Construction_Entities_AcadHelp.htm> Luettu 28.10.2022

Feature-based models, 2021. Verkkoaineisto. Solidworks Help. <https://help.solidworks.com/2022/english/SolidWorks/acadhelp/c_Feature_based_Models.htm?id=af6b43466b4441d3b64e9ca546b8ef2c#Pg0> Päivitetty 14.10.2021. Luettu 28.10.2022.

Hietikko, E. 2020. SolidWorks tietokoneavusteinen suunnittelu. E-kirja. Helsinki: Books on Demand.

Inventor, 2022. Verkkoaineisto. Autodesk. <<https://www.autodesk.fi/products/inventor/overview?term=1-YEAR&tab=subscription>> Luettu 26.11.2022.

Langnau, L., 2019. Parametric Modeling: still going strong thirty-one years on. Verkkoaineisto. 3D CAD World. <<https://www.3dcadworld.com/parametric-modeling-still-going-strong-thirty-one-years-on/>> Päivitetty 9.10.2019. Luettu 28.10.2022.

Oanes, S., 2021. The History of Solidworks. Verkkoaineisto. GoEngineer. <<https://www.goengineer.com/blog/history-of-solidworks>> Päivitetty 24.9.2021. Luettu 28.10.2022.

Reference Geometry, 2021. Verkkoaineisto. Solidworks Help. <https://help.solidworks.com/2021/english/SolidWorks/sldworks/c_Reference_Geometry_Overview.htm?id=206cebd374574ca9b3e9ad563e5d5332#Pg0> Luettu 28.10.2022

Sheet metal parts, 2021. Verkkoaineisto. Autodesk help. <<https://knowledge.autodesk.com/support/inventor/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2021/ENU/Inventor-Help/files/GUID-F3DB9740-D340-4B6C-B9D9-50EAFB2DFAB1-htm.html>>

SolidWorks-tuotteet, 2022. Verkkoaineisto. Cadworks. <<https://www.cadworks.fi/fi/products/>> Luettu 26.11.2022.

Tuhola E., Viitanen K., 2008. 3D-mallintaminen suunnittelun apuvälineenä. AMK-Kustannus Oy